

Lauri-Matias Reponen

# LT120E:N SÄHKÖISTÄMINEN

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Diplomityö  
Elokuu 2019

## TIIVISTELMÄ

Lauri-Matias Reponen: LT120E:n sähköistäminen  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Automaatiotekniikan DI  
Elokuu 2019

LT120E on Metso Mineralsin mobiilimurskauslaitos, joka on varustettu leukamurskaimella, käyttää dieselgeneraattoria päätehonlähteenään ja on tällä hetkellä yrityksen sähkötoimisin laite. Se pohjautuu hydrauliseen LT120:hen ja soveltuu käytettäväksi samalla tavalla kuin tämäkin, mm. esimurskaimena tavanomaisessa mursketuotantoketjussa tai purkutyömaalla jätteen (esim. teräsbetoni) pienentämisessä.

Työssä tarkoituksena on tutkia LT120E:n sähköistämistä, eli hydraulisten toimintojen korvaamista sähköisillä, kannattavuuden, ympäristön sekä saavutettavien etujen näkökulmasta. Aihe on pinnalla teollisuudessa, sillä sähkökäyttöisiä laitteita tulee markkinoille yhä useammin. Myös kilpailijat ovat osoittaneet kiinnostusta niitä kohtaan, joten selvitys on perusteltu.

LT120E:ssä hydraulisia toimintoja ovat syöttimen pyöritys, tela-ajo, jäähdyttimen pyöritys, asetuksen säätö, pääkuljettimen nosto, syöttimen laitojen käyttö, pääkuljettimen taitto sekä puomi-vasara-yhdistelmä. Kolme ensimmäistä ovat pyörivän liikkeen toimintoja, jotka voidaan muuttaa sähköisiksi melko helposti. Loput ovat sylinteritoimintoja, eli lineaarisia, ja näin ollen hieman hankalammin sähkökomponenteilla toteutettavia. Puomi-vasara-yhdistelmä päätettiin jättää pois tutkittavista toiminnoista, sillä siihen ei suoraan löytynyt sähköistä korvaajaa ja se voidaan toteuttaa itsenäisenä hydraulisena moduulina sähkökoneeseen.

Yksi mahdollinen toteutus laitteesta on täysin sähköinen versio, jossa kaikki hydraulikomponentit korvataan sähköisillä, lukuun ottamatta jäähdyttimen pyöritystä. Se voidaan toteuttaa viskokytkimen avulla. Vaihtaminen ei tietenkään onnistu ilman muutoksia, mutta niiden yksityiskohtainen pohtiminen ei sisälly työhön. Sylinteritoiminnot korvataan tässä toteutuksessa sähkösylintereillä. Niissä sähkömoottorin pyörimisliike muutetaan lineaariseksi ruuvivälityksen (kuula- tai planeettaruuvi) avulla. Valituissa komponenteissa toimitetaan sähkömoottori, sylinteri, johtosarja sekä ohjaus mukana.

Toinen vaihtoehto on sähköhydraulinen versio, jossa kasvatetaan sähkökomponenttien määrää. Siinä pyöritystoiminnot toteutetaan samoin kuin täyssähköisessäkin, mutta sylinterit säilytetään hydraulisina ja niille tehdään omat hydraulipiirit. Jokaisella niistä on oma pumppu, tankki, sähkömoottori ja muut tarvittavat komponentit itsenäiseen toimintaan, ja niille tuodaan teho sähköisenä. Piirejä on neljä ja niitä voidaan jättää pois, mikäli asiakas ei halua jotakin sylintereillä toimivaa optiota. Näin saadaan hajautettu hydraulijärjestelmä vanhan keskitetyn tilalle.

Näistä vaihtoehtoista paremmalta vaikuttaa sähköhydraulinen toteutus: Se on halvempi kuin vanha hydraulijärjestelmä, ja huomattavasti halvempi kuin täyssähköinen. Se myös vähentää laitteessa tarvittun öljyn määrää n. 87 %, joten ympäristöriski pienenee ja ympäristölupien saaminen helpottuu. Toisaalta täysin sähköistä järjestelmää kannattaisi kokeilla, jotta saataisiin paremmin selville sähkösylinterien soveltuvuus murskaustyömaalle. Lisäksi tulevaisuudessa laitteet tulevat luultavasti olemaan pääasiassa sähköisiä, joten testejä olisi hyvä suorittaa jo varhaisessa vaiheessa.

## ABSTRACT

Lauri-Matias Reponen: LT120E electrification  
Master of Science thesis  
Tampere University  
Automation engineering  
August 2019

---

The LT120E is a mobile crushing plant, manufactured by Metso Minerals. It's equipped with a jaw crusher, uses a diesel generator as the main power source and is currently the most electrical mobile plant the company has to offer. The LT120E is based on the fully hydraulic model LT120 and is suitable for use in the same situations, such as pre-crushing in aggregates production line or in a demolition site for waste size reduction.

The goal of this thesis is to study electrifying the LT120E (replacing the hydraulic features with electric) from profitability, environmental and benefit standpoint. Electrification is a very popular trend in almost any industry, and more electrical machinery can be found in the markets. Rivaling companies have also shown interest towards electrical components, so this research is justifiable.

The hydraulic features in LT120E are feeder rotation, track drive, cooler propeller, crusher setting, main conveyor raise, feed hopper extension raise, main conveyor folding and boom-hammer -combination. The first three features are easily modified to electric since they require rotational components. The rest are a bit harder though, since they are linear motion features that work with cylinders. The boom-hammer -combination was excluded from this research because no electric replacement was found for it and it can be added as an individual hydraulic module if required.

A fully electrical machine is one solution to the problem. In it, all the hydraulic components are replaced by electrical except for the cooler propeller, which gets its power straight from the engine via a viscous coupling. Replacing all these components is obviously not going to work out without modifications to the structure, but these are not included in this thesis. The hydraulic cylinders are replaced with electrical ones that transform the rotational motion of the motor to linear with a lead screw (ball or planetary screw in this case). The selected electrical cylinders come with the motor, cylinder part, wire kit and control unit.

Another solution is a hydroelectric machine where the number of electrical features is increased. All the rotation features are installed with an electrical motor, whereas cylinders remain hydraulic. Also, the centralized hydraulic circuit is replaced by a distributed one, where only four small circuits are made for the cylinders and power is transmitted to them electrically. Some circuits can be left out in case the customer doesn't want some of the options.

Distributed hydroelectric system seems to be the better option currently. It's slightly cheaper than the centralized system and significantly cheaper than the fully electrical one. The amount of oil is also 87 % smaller, which means smaller environmental risk and easier permits. On the other hand, if electrical machinery is considered to be the way to go in the future, Metso might want to consider assembling at least some prototypes. This would allow for testing the electrical cylinders and their suitability to a crushing site. The earlier these tests are carried out, the faster it is to switch over to these components.

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus tehtiin Metso Minerals Oy:lle diplomityönä. Yritys oli mukana koko prosessin ajan ja tuki tarvittaessa. Lisäksi sähkösylinterien valinnassa auttoivat Bosch Rexrothin edustajat. Työn tarkastaja Tampereen teknillisellä yliopistolla (Tampereen yliopistolla 2019 alkaen) hoiti pääasiassa rakenteen kommentoimisen, kun taas tiimin johtaja Metsolla vastasi sisällön tarkastelusta. Moni muukin kollega auttoi löytämään uusia näkökulmia tai löytämään vastauksia kysymyksiin. Vaikka työn sisältö onkin tuotettu itsenäisesti, nämä ihmiset auttoivat kulkemaan oikeaan suuntaan.

Haluan kiittää tiimini johtajaa Jukka-Pekka Rantasta avusta ja kärsivällisyydestä koko diplomityön teon ajalta. Kiitos myös työkavereille, jotka kiinnostuivat aiheesta ja tarjosivat ammattitaitoaan aina kun sitä tarvittiin. Kaikista niistä lähipiirini ihmisistä, jotka auttoivat henkisesti työn ajan, haluan vielä erityisesti kiittää Jaakkoa. Hänen ohjeensa toi uutta motivaatiota joka kerta, kun sen kuuli.

Tampereella, 26.8.2019

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	LÄHTÖKOHDAT .....	3
2.1	Metso Oyj.....	3
2.2	Laitteet.....	3
2.2.1	LT120.....	4
2.2.2	LT120E .....	5
2.3	Motivaatio .....	6
2.4	Teknologia.....	9
3.	TOIMINNOT JA TOIMILAITTEET .....	12
3.1	Tela-ajo.....	12
3.2	Murskaimen asetuksen säätö .....	14
3.3	Syötin .....	18
3.4	Syöttimen laidat.....	20
3.5	Pääkuljetin.....	24
3.6	Magneettierotin .....	26
3.7	Sivukuljetin .....	27
3.8	Puomi ja vasara .....	27
3.9	Moottori.....	28
3.10	Jäähdytin.....	29
4.	LAITE-EHDOTUKSET .....	31
4.1	Täysin sähköinen toteutus .....	31
4.2	Sähköhydraulinen toteutus .....	35
5.	LAITEVERTAILU .....	38
5.1	Vertailu nykyiseen LT120E:hen .....	38
5.2	Keskinäinen vertailu.....	41
6.	LAITTEEN TULEVAISUUS.....	42
7.	YHTEENVETO JA ANALYSOINTI .....	43
	LÄHTEET.....	47

LIITE A: LT120:N JA LT120E:N ANTURIDATA

LIITE B: SÄHKÖHYDRAULISEN TOTEUTUKSEN LASKUT JA OSAT

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

EHA	Electrohydraulic Actuator, sähköhydraulinen toimilaite
EMA	Electromechanical Actuator, sähkömekaaninen toimilaite
EMC	Electromechanical cylinder, sähkömekaaninen sylinteri
EMC-HD	Electromechanical cylinder – Heavy Duty, sähkömekaaninen sylinteri kovaan käyttöön
EU	Euroopan unioni
IAP	Integrated Actuator Package, integroitu toimilaitepaketti
IM	Induction motor, oikosulkumoottori
IPM-moottori	Interior Permanent Magnet -moottori, avonapainen kestmagneettimoottori
LT	Lokotrack-tuoteperhe
MEA	More Electric Aircraft, sähköisempiä lentokoneita
SRM	Switched Reluctance Motor, vaihtoreluktanssimoottori
teholl.	tehollinen
VTT	Teknologian Tutkimuskeskus
$\alpha$	kulma
$\beta$	kulma
$\eta$	hyötysuhde
$\omega$	kulmanopeus
$A$	Pinta-ala
$a$	kiihtyvyys
$b$	etäisyys
$c$	etäisyys
cos	kosinifunktio
$F$	voima
$G$	painovoima
$i$	välityssuhde
$l$	iskunpituus
$M$	momentti
$m$	massa
$N$	tukivoima
$n$	pyörimisnopeus
$P$	teho
$p$	paine
$p_p$	napapariiluku
$Q$	tilavuusvirta
$r$	säde
sin	sinifunktio
$t$	aika
$v$	nopeus
$V_p$	kierrotilavuus
%	prosentti, lukujen suhde
°	aste, kulma
°C	Celsiusaste, lämpötila
bar	baari, paine
cm <sup>3</sup> /rev	kuutiosenttimetriä kierroksella, kierrostitavuus

dB (A)	A-painotettu desibeli, äänenvoimakkuus ihmiskorvan kuulotaajuus- alueella
dm <sup>3</sup>	kuutiodesimetri, tilavuus
h	tunti, aika
Hz	Herzi, taajuus
kg	kilogramma, massa
km/h	kilometriä tunnissa, nopeus
kN	kilonewton, voima
kNm	kilonewtonmetri, momentti
kVA	kilovolttiampeeri, teho
l/min	litraa minuutissa, tilavuusvirta
m	metri, matka
m/s <sup>2</sup>	metriä sekunnin neliössä, kiihtyvyys
m <sup>3</sup> /rev	kuutiometriä kierroksella, kierrostilavuus
m <sup>3</sup> /s	kuutiometriä sekunnissa, tilavuusvirta
mm	millimetri, matka
MPa	megapascal, paine
N	Newton, voima
Nm	Newtonmetri, momentti
rpm	kierrosta minuutissa, pyörimisnopeus
s	sekunti, aika

# 1. JOHDANTO

Ympäristöasiat ovat jo jonkin aikaa olleet näkyvästi esillä mediassa ja politiikassa, eikä tähän ole näkyvissä muutosta. Monet valtiot ovat alkaneet asettaa rajoituksia ja vaatimuksia mm. päästöille, mikä on ajanut yrityksiä kehittämään tuotteitaan tehokkaammiksi ja päästöttömämmiksi. Sähkökäyttöjen lisääminen on nähty yhdeksi ratkaisuksi sekä henkilöautoteollisuudessa, että työkoneita tuottavassa teollisuudessa. Tämä on johtanut mm. ainoastaan sähköautoja valmistavan Tesla-automerkin saapumiseen markkinoille. Sähkökäyttöjä ei turhaan olla lisätty erilaisissa laitteissa, sillä niiden hyötysuhde on yleensä hyvä ja esimerkiksi hydraulikkaan verrattuna ne eivät vaadi valtavaa määrää öljyä toimiakseen. Sähkömoottoreita on myös useita eri tyyppisiä, joista voidaan valita optimaalinen toimilaite moneen eri käyttötarkoitukseen.

Myös Metso Minerals Oy on huomannut tämän muutoksen markkinoilla, ja alkanut tutkia laitteidensa sähköistämistä. Yritys tuottaa Tampereen tehtaallaan pääasiassa tela-alustaisia mobiilimurskauslaitoksia, jotka käytännössä muokkaavat kiveä halutun kokoiseksi ja muotoiseksi asetusarvoista riippuen. Jokainen laitos on myös itsenäinen kokonaisuus, jota voidaan ajaa työmaalla paikasta toiseen. Laitteet ovat suuria ja vaativat paljon tehoa, siksi niissä on myös oma dieselmoottori tehonlähteenä.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia, olisiko Metson LT120E-murskauslaitoksen kehittäminen sähköisempään suuntaan järkevää tällä hetkellä. Kyseinen laite on yksi yrityksen sähköisimpiä laitteita jo nykyään, mistä syystä nimessä on ”E” lopussa, mutta siinä on vielä paljon hydraulitoimintoja käytössä. Samalla luodaan katsaus uusiin sähkökomponentteihin, joita laitteessa voitaisiin käyttää. Tässä apuna toimii Bosch Rexroth, jonka edustajat opastavat heidän sähköisten sylinteriensä toimintaan.

Tavoitteena on tutkia yleisellä tasolla, mitä sähköinen laite vaatisi ja minkälaisia hyviä ja huonoja puolia sähkökäyttöön siirtyminen toisi. Täysin sähköisen laitteen komponenteista tehdään ehdotus, jonka pohjalta saadaan tarjous Bosch Rexrothilta. Lisäksi muodostetaan toinen laite-ehdotus sähköhydraulisesta toteutuksesta, joka hyödyntää hajautettua järjestelmää. Tähän ehdotukseen saadaan hinnat suoraan Metson omasta järjestelmästä. Jotta laitekoonpanoja voitaisiin suunnitella yleisellä tasolla, täytyy ensin kuitenkin mitoittaa eri toimintojen tarpeet ja laskea vaaditut tehot tai voimat.

Kun laite-ehdotukset on koottu, niitä voidaan vertailla sekä toisiinsa, että nykyiseen LT120E:hen. Vertailulla on tarkoitus korostaa järjestelmien eroja ja pyrkiä ottamaan erilaisia näkökulmia huomioon. Avainkriteerejä ovat mm. suunnittelun ja kokoonpanon vaikeus, ympäristöarvot ja hinta. Näitä avaamalla on tarkoitus antaa yrityksen päättäjille



henkilöille mahdollisimman hyvä kokonaiskuva siitä, mitä laitteen sähköistäminen vaatisi.

Työssä lähdetään liikkeelle yrityksen ja käsittelyssä olevan laitteen nopealla esittelyllä. Sen jälkeen pohditaan työn motiiveja tarkemmin ja tutustutaan tarjolla olevaan teknologiaan. Tässä auttavat mm. raportit ilmailualalta, jossa sähköjärjestelmien käyttöä on suunniteltu jo pidemmän aikaa. Tämän jälkeen siirrytään tutkimaan laitteen eri toimintoja yksi kerrallaan. Samalla lasketaan toimintojen vaatimuksia. Näiden pohjalta muodostetaan molemmat laite-ehdotukset ja avataan niitä lukijalle hieman. Tämän jälkeen vertaillaan ehdotuksia, pohditaan laitteen tulevaisuutta ja lopuksi suoritetaan yhteenveto aiheesta. Työssä käytetään pääasiassa kirjallisuuslähteitä tukemaan työn motiiveja ja avaamaan eri laitteiden tai toimintojen toimintaa, mutta myös yrityksen sisäisiä tietoja on hyödynnetty.

## 2. LÄHTÖKOHDAT

Tämän työn tavoite on vastata kysymykseen, pitäisikö Metson mobiilimurskauslaitos LT120E (LT, Lokotrack) muuttaa kokonaan sähkötoimiseksi. Lisäksi pyritään tuottamaan pari erilaista ehdotusta sähkötoimisesta laitteesta. Tässä luvussa kerrotaan työn taustaa ongelman ymmärtämiseksi. Aluksi käsitellään pintapuolisesti Metsoa yhtiönä ja työssä tutkittavaa laitetta, LT120E:tä. Samalla kerrotaan myös laitteen alkuperäisestä hydraulisesta versiosta, LT120:sta. Laitteiden käyttöön erilaisissa prosesseissa ei pureuduta kovin syvällisesti, koska niitä on paljon ja se ei ole työn kannalta olennaista tietoa. Tämän jälkeen käsitellään motivaatiota, eli miksi LT120E:n sähköistämistä on syytä tutkia, ja lopuksi käsitellään työssä hyödynnettäviä teknologioita.

### 2.1 Metso Oyj

Metso Oyj on vuoden 2017 vuosikertomuksensa mukaan maailman johtavia materiaali-virtaukseen keskittyviä yhtiöitä kaivos-, murskaus-, kierrätys- ja prosessiteollisuuden alalla. Vuonna 2017 Metso myynti oli noin 2,7 miljardia euroa. Se työllistää maailmanlaajuisesti yli 12 000 työntekijää ja operoi yli 50:ssä eri maassa. [16]

Vuosikertomuksesta saadaan myös selville, että Metson kaksi raportointisegmenttiä ovat Minerals ja Flow Control, joista ensiksi mainittu kattoi myynnistä 76 %. Minerals tuottaa mineraalien prosessointiin tarkoitettuja laitteistoja ja ratkaisuja asiakkailleen. Se vastaanotti tilauksia hieman yli 2 300 kappaletta ja työllisti noin 8 900 työntekijää. [16]

Vuosikertomuksesta selviää myös, että vuoden 2018 alusta Minerals-segmentti kattaa kaivos- ja murskauspuolen tuotteet, palvelut ja kulutusosa, sekä kierrätyspuolen kaikki palvelut. Tampereen Lokomolla sijaitseva tehdas tuottaa pääasiassa murskaus- ja seulon- talaitoksia sekä pelkkiä murskaimia, joten se kuuluu Metso Mineralsin alle. Ensimmäinen Lokotrack murskauslaitos tuotettiin tällä tehtaalla 1985 ja siitä on sittemmin kasvanut tehtaan päätuote. Tehtaaseen investoitiin hiljattain noin miljoona euroa uutta tuotantolinjaa varten ja ensimmäinen kone poistui uudelta linjalta alkuvuonna 2018. Tuotantolinja nopeuttaa tyypillisempien mallien tuotantoa ja parantaa työskentelyturvallisuutta. [16]

### 2.2 Laitteet

Metson Lokotrack-tuoteperheen laitteet ovat tela-alustaisia murskauslaitoksia, joita käytetään murskeen tuotannossa tuotteen pienentämiseen ja muotoiluun. Ne koostuvat pääpiirteittäin kaikki murskaimesta, yhdestä tai useammasta kuljettimesta, telastosta ja jonkinlaisesta syöttimestä. Laite ajetaan teloilla oikeaan paikkaan työmaalla, syötin käsittelee sille tulevan materiaalin ja ohjaa eteenpäin murskaimeen, murskain käsittelee materiaalin, ja kuljetin tai kuljettimet toimittavat prosessissa syntyneen tuotteen joko seuraavan

laitteen syöttimeen, välituotteen kasaan tai lopputuotteen kasaan. Lisäämällä erilaisia murskauslaitoksia peräkkäin ketjuun, saadaan useampaa eri lopputuotetta. Joissakin laitteissa syötin voidaan korvata seulalla, joka erottelee tuotteen koon perusteella eri kuljettimille. Murskauslaitokset eivät tarvitse ulkoista teholähdettä, vaan laitteissa on aina dieselmoottori. [17]

Työssä tutkittava laite pohjautuu täysin hydrauliseen LT120 murskauslaitokseen, joka on esitelty Kuva 1. Nimen osa ”120” kertoo murskaimen koon ja tyyppin. Pelkän murskaimen nimi on C120, mikä tarkoittaa sitä, että se on tyypiltään leukamurskain ja sen syöttöaukon leveys on 120 cm [19]. Tutkittava laite taas on nimeltään LT120E ja nimessä oleva ”E” kertoo laitteen olevan sähkökäyttöinen. Siinä moottoriin on kytketty generaattori, ja laitetta voidaan käyttää myös ulkopuolisen virtalähteen avulla [18]. Vaikka LT120E onkin sähkökäyttöinen versio toisesta laitteesta, se ei vielä ole täysin sähkötoiminen nimestään huolimatta.



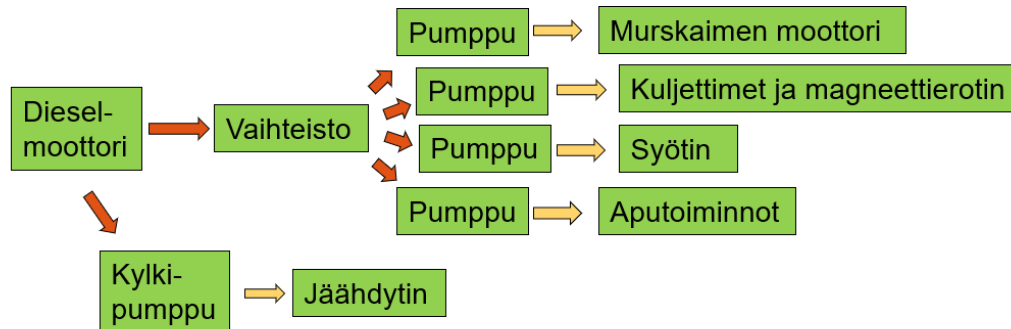
**Kuva 1.** LT120 murskauslaitos. E-malli on ulkoisesti lähes saman näköinen.[26]

LT120 ja LT120E ovat niin sanottuja esimurskaimia, eli ne ovat yleensä ensimmäisenä murskaimena, johon materiaali ohjataan valmistusprosessissa [18,19]. Joskus valmistajat haluavat useamman eri kokoluokan kiveä prosessinsa tuotteena, joten LT120 vain pienentää materiaalia sopivammaksi myöhempään muokkaukseen. Metson omassa esitteessäkin LT120 on samassa tuotantolinjassa esim. LT300HP karamurskainlaitoksen ja ST620 seulontalaitoksen kanssa [17]. Siinä kiveä muokataan prosessin myöhemmässä vaiheessa karamurskaimella, jotta siitä saadaan tasalaatuisempaa. LT120E:tä voidaan käyttää myös esimerkiksi rakennuksen purkutyömailla materiaalin pienennyksessä, koska murskaimella voidaan käsitellä esim. teräsbetonia [17].

### 2.2.1 LT120

LT120 vakioversiossa on käytössä Caterpillarin C13 dieselmoottori. Se on yhdistetty vauhtipyörän välityksellä vaihteistoon, joka pyörittää neljää hydraulipumppua. Niiden lisäksi moottorin kylkeen on liitetty viides pienempi hydraulipumppu, ns. kylkipumppu,

joka tuottaa virtauksen jäähdyttimen propellia pyörittävälle moottorille. LT120:n energiavirtaukset on esitelty Kuva 2, josta ilmenee kunkin pumpun tarkoitus. Energian olo-  
muotoja kuvaa nuolten värit: punainen on mekaanista ja keltainen hydraulista energiaa. [33]



**Kuva 2.** LT120:n energiavuokaavio

Laitteen hydrauliset toiminnot käyvät myös ilmi Kuva 2. Aputoimintoihin sisältyy murskaimen asetuksen säätö, tela-ajo, pääkuljettimen nosto, syöttimen laitojen nosto ja paikalleen lukitseminen, pääkuljettimen jatkeen nosto sekä hydraulisen vasaran ja sen puomin käyttö. Osa näistä toiminnoista on optioita, mutta niiden tutkiminen on syytä liittää työhön, jotta koko laitteen sähköistyksestä saadaan kattava kuva [17].

Tästä työstä mahdollisesti seuraavan LT120E:n sähköistyksen yksi tavoitteista on saada laitteelle parempi hyötysuhde, jonka kautta asiakas säästää polttoainekustannuksissa ja päästöjen määrä vähenee. LT120:n polttoainetaloutta on nykyisellään vaikea parantaa pelkkää hydraulijärjestelmää optimoimalla, koska jo nyt dieselmoottoria voidaan käyttää hyvän hyötysuhteen alueella hyvin valitun pumppujakovaihteen ja pumppujen määrän ansiosta. Laitteen komponenttikustannuksissa voitaisiin säästää esim. vähentämällä pumppuja, poistamalla jakovaihte ja vaihtamalla jäähdytinpiiri suoravetoiseen, mutta hyötysuhde kärsisi tästä. [33]

## 2.2.2 LT120E

LT120E on ulkoisesti sama laite kuin LT120. Näiden kahden erona on se, että E-mallissa pää- ja sivukuljettimien moottorit, magneettierotin ja murskaimen leukaa liikuttava moottori toimivat sähköllä, muut toiminnot ovat yhä hydraulisia. LT120E:n energiavirtaukset esitellään Kuva 3 ja nuolien värit kertovat energian muodon muuten samoin kuin Kuva 2, mutta sininen tarkoittaa sähköenergiaa. Käyttövirtansa sähkötoiminnot saavat vakioversiossa Caterpillarin C13 moottoriin yhdistetystä 420 kVA generaattorista [18]. Laitteita on valmistettu myös jonkin verran Volvon vastaavan kokoisella TAD1352GE-moottorilla. Generaattori antaa käyttövirran myös yhdelle suurelle sähkömoottorille, johon on



töjä, letkuja, putkia, suodattimia, säiliön nesteelle sekä luonnollisesti itse nesteen. Hydraulijärjestelmää täytyy myös jäähdyttää vaurioiden estämiseksi ja nesteen viskositeetin hallitsemiseksi. Hydraulijärjestelmä on lämpötilakriittinen erityisesti säätötarkoituksissa, koska lämpötilan muutos vaikuttaa suoraan öljyn viskositeettiin. Tämä taas saattaa heikentää tarkkuutta, koska nesteen virtausominaisuudet muuttuvat. Muutoksia voidaan hillitä käyttämällä hydraulioöljyjä, joissa on korkea viskositeetti-indeksi, mutta tällöin hinta nousee myös, varsinkin kun laitteeseen tulee useampi sata litraa öljyä [15]. Toinen vaihtoehto on taata öljyn riittävä lämmitys ja jäähdytys, jotta viskositeetti pysyy halutulla alueella. LT120E:ssä käytetty menetelmä nesteen jäähdyttäminen erillisellä kennolla on hyvin yleinen, mutta ei välttämättä tehokkain. Jos kaikki edellä mainitut komponentit voidaan poistaa laitteesta, vältetään öljyn lämpötilakriittisyyden aiheuttamilta ongelmilta ja laitteen massa pienenee huomattavasti. Luonnollisesti sähköinen järjestelmä vaatii toimiakseen myös jäähdytystä, johtoja ja komponentteja toimilaitteiden ohjaukseen, mutta komponenttien ja johtojen ei tarvitse sietää korkeita paineita ja paineiskuja, joten ne voidaan valmistaa kevyemmistä materiaaleista. Yleensä sähköiset toimilaitteet myös hoitavat itse jäähdytyksensä.

Hydraulioöljyn jäähdytyksen puuttuminen tuo myös toisen edun. Laitteen jäähdyttimeltä ei vaadita samanlaista jäähdytystehoa, jolloin se voi olla hiljaisempi. Metso on kehittänyt Urban-sarjan LT murskaimia käytettäväksi olosuhteissa, joissa laitteen kova melu saattaa rajoittaa ympäristöluvan saamista. Laitteperhe koostuu juurikin C-sarjan leukamurskaimista ja kahta kokoluokkaa pienemmällä LT106-murskauslaitoksella on saatu aikaan jopa 60 % pienempi 85 dB(A) äänialue [20]. Kaikki meluvähennykset helpottavat laitteen myyntiä esimerkiksi kaupungeissa tapahtuvaa murskausta varten. Kuten laitteen esitte-lyssä todettiin, LT120E:tä on mahdollista käyttää myös verkkovirralla, jolloin generaattoripakettia ei tarvitse käyttää lainkaan prosessin aikana. Öljyn poistaminen laitteesta kadottaisi myös tarpeen käyttää jäähdytintä verkkovirralla murskattaessa, joten melu vähenisi entisestään.

Hydraulikomponenttien puuttumisella on myös potentiaalia laskea järjestelmän kustannuksia. Metson omien hankintahintojen perusteella esimerkiksi LT120:n moottorimoduulissa hydraulisen tehon tuottamiseen käytetty vaihteistopumppupaketti on noin 8 % kalliimpi kuin LT120E:ssä käytetty generaattori. Erillisen sähkömoottorikäyttöisen hydraulipumpun ja tankin kustannukset kumoavat tämän säästön moninkertaisesti tällä hetkellä, joten niiden puuttuminen säästäisi myös rahaa verrattuna alkuperäiseen LT120E:hen. Toisaalta vahvasähköjärjestelmä vaatii toimilaitteiden lisäksi muita komponentteja toimiakseen, esim. keskuksen virran ohjausta ja seuranta varten, sekä taajuusmuuttajia nopeussäätöön. Näiden kustannuksia on vaikea arvioida tässä kohtaa, koska toteutus on vielä auki.

Kustannussäästöjä on mahdollista saavuttaa myös laitteen käytössä, sillä kun LT120 ja LT120E laitteiden kulutuksia vertailee, voi havaita sähköversion käyttävän vähemmän

polttoainetta. Datan hankkimiseen käytettiin Metson omaa Metrics-työkalua, joka on tarkoitettu laitteiden tilan seurantaan ja mittausdatan saamiseen etänä [21]. Kirjoitushetkellä ei ollut saatavilla tietoja kuin alle kymmenestä LT120E laitteesta, joista osa karsiutui virheellisten tai epäilyttävien arvojen takia pois. LT120 laitteita puolestaan oli tarjolla enemmän, mutta niistäkin jätettiin osa pois. Karsinnalla valittiin laitteita, joiden kuormitus on samaa tasoa valikoituneiden LT120E laitteiden kanssa ja moottoritunteja yli 500. Kuormitus tarkoittaa tässä laitteen käyttötuntien ja käynnissä oloajan suhdetta. Liitteestä A löytyy taulukko molempien laitteiden tiedoista ja valikoituneista koneista. Tutkituissa laitteissa kuormitus oli kaikissa 90 % ja 70 % välillä, sähköversiossa keskiarvolla 78 % ja hydrauliversiossa 82 %. Kulutus jakautui moottorituntien suhteen melko tasaisesti molemmissa laitetyypeissä eikä keskimääräinen kulutus seurannut moottorituntien määrää. Kaikissa laitteissa oli Caterpillarin C13 moottori, paitsi yhdessä LT120E:ssä, joka käytti Volvon TAD1352GE moottoria. Datasta saadut olennaisimmat tiedot löytyvät Taulukko 1. Siitä voi havaita, että laitteiden keskimääräisessä kulutuksessa käyttötunteja kohti LT120E:n kulutus oli vain 81,2 % LT120:n kulutuksesta. Toinen hyvä mittari vertailulle oli tehollinen polttoaineenkulutus suhteessa tehollisiin moottoritunteihin. LT120E:ssä kulutus oli tällöin keskimäärin 74 % LT120:n vastaavasta. Anturidatan ja laskennan perusteella on selkeää, että sähkökomponenttien käyttäminen laitteen nykyisessä sähköversiossa on parantanut sen kulutusta huomattavasti. Tämän perusteella voidaan odottaa täysin sähköisen laitteen olevan kulutukseltaan myös parempi, kuin LT120 ja mahdollisesti jopa parempi kuin LT120E.

**Taulukko 1.** LT120:n ja LT120E:n kulutusten vertailu

	<b>Keskiarvo</b>	<b>Varianssi</b>	<b>Keskihajonta</b>
<b>LT120 keskim. kulutus (l/h)</b>	24,63	28,84	5,37
<b>LT120 tehollinen kulutus/ teholliset moottoritunnit (l/h)</b>	30,97	39,25	6,27
<b>LT120E keskim. kulutus (l/h)</b>	20,00	24,67	4,97
<b>LT120E tehollinen kulutus/ teholliset moottoritunnit (l/h)</b>	22,91	27,07	5,20

Lajunen et al. laatiman selvityksen [14] mukaan sähköinen voimansiirto on nykyään kilpailukykyinen vaihtoehto hydrostaattisille ja hydrodynaamisille voimansiirtovaihtoehdoille. Sen avulla saavutetaan vähintään yhtä hyvä suorituskyky, ja se on luonnostaan hyötysuhteeltaan parempi sekä päästötön. Mobiililaitteissa sähköinen voimansiirto voisi jopa parantaa laitteen ohjattavuutta ja ohjauksen tarkkuutta. Tällä hetkellä ei-tiekäyttöisten mobiililaitteiden voimansiirron hybridiksi muuttamisen hyödyt tunnistetaan, mutta tällaisia ratkaisuja ei ole paljoa tarjolla korkeampien kehityskustannusten takia. Voimansiirron sähköistämisessä hinnan lisäksi muutosta hidastavat komponenttien luotettavuus ja kestävyys. Ei-tiekäyttöisiä mobiililaitteita käytetään usein hankalissa olosuhteissa ja

niiden kuormitus voi vaihdella todella paljon. Lisäksi sähkökomponentit voivat olla suuria erityisesti järeissä sovellutuksissa. Esimerkiksi ajo vaatii usein sähkömoottorien lisäksi taajuusmuuttajan, joka vie huomattavasti tilaa. [14]

Sähkökäyttöön siirtyminen ei kuitenkaan tarjoa pelkkiä positiivisia puolia. Asiakkaan näkökulmasta se saattaa aiheuttaa jopa ongelmia, sillä jos hydraulikäyttöisestä laitteesta hajoaa jokin toimilaite tai letku, suurin osa asentajista osaa vaihtaa sen kaavioiden ja tarvittavien työkalujen avulla. Sähkökomponenttien vaihtaminen puolestaan vaatii lähes aina sähköasentajan. Vian etsintäkin voi osoittautua hankalammaksi sähkökäyttöisessä laitteessa, sillä esimerkiksi hydraulikomponentin hajoamisen havaitsee vuotona, jos kyseessä on reikä letkussa tai laitteessa, ja vuotokohta on paikannettavissa öljyä seuraamalla. Jos vuotoa ei ole, toimilaite on luultavasti rikki tai venttiili on tukossa. Sähkövika taas vaatii lähes aina erillisten laitteiden (esim. virtamittari) käytön vian etsinnässä sekä tietämystä sähkökomponenttien toiminnasta.

Hydraulijärjestelmä on myös hyvä luontainen vaimennin järjestelmän värähtelyn hillitsemiseen, sillä se joustaa luonnostaan jonkin verran [11]. Erityisesti tasaisen hakkaavassa liikkeessä, jollaista murskauslaitoksissa usein esiintyy, hydraulijärjestelmä suojaa komponenttejaan vaurioilta. Sähköiset toimilaitteet taas saattavat vaurioitua tai väsyä ajan myötä nopeasti vastaavassa tilanteessa. Esimerkiksi lineaariliikkeisissä sähkötoimilaitteissa, jotka vaativat sähkömoottorin pyörimisliikkeen muuttamista mekaanisesti lineaarisiksi, mekaaninen välitys ottaa vastaan toimilaitteen akselin suuntaiset iskut ja värähtelyt, kun taas hydraulisylinterissä ne siirtyvät männän kautta hydraulioöljyyn, joka puolestaan tasaa ne avoinna olevaan järjestelmään paineaaltoina.

## 2.4 Teknologia

Ilmailualalla on viime vuosina pyritty kohti sähköisempiä lentokoneita (more electric aircraft, MEA) menestyksekkäästi, mikä käy ilmi Sarlioglu et al. tekemästä tutkimuksesta [37]. Heidän mukaansa monet ennen hydrauliset tai pneumaattiset alijärjestelmät on saatu muutettua joko kokonaan tai edes osittain sähköisiksi. Garcia et al. puolestaan kertovat sähkömekaanisten toimilaitteiden lisääntyneen ilmailualalla matkustajakoneissa vähemmän kriittisissä toiminnoissa sekä sotilaslentokoneissa, viitaten R. Aldenin artikkeliin nimeltä *C-141 and C-130 power-by-wire flight control systems* [8]. Muutoksen ajavina tekijöinä ovat olleet mm. päästöjen vähentäminen ja kulutuksen pienentäminen, mihin puolestaan on luultavasti pyritty päästölainsäädäntöjen tiukentumisen ja erilaisten hiilidioksidiverotusten ehdotusten myötä. Tutkimuksissa viitataan usein Boeingin 787 ja Airbus A380 lentokonemalleihin muutoksen keulakuvina. Tämä osoittaa selkeästi suunnan, johon ilmailuala on menossa, sillä esim. vuonna 2016 nämä kaksi yritystä olivat liikevaihdoltaan kaksi suurinta ilmailualan yritystä [38], vaikka mukaan lasketaan sekä kaupallinen että sotilaallinen tuotanto. 787 ja A380 ovat valmistajiensa uudempia lentokonemalleja, joissa molemmissa on pyritty mahdollisimman sähköisiin ratkaisuihin pitämällä kuitenkin turvallisuusseikat mielessä. Päästöjen vähentämiseen pyrkimisen on syytä olettaa



jatkuvan alalla, mikä käy ilmi mm. Vision 2020 -raportista [6]. On mahdollista, että lentokoneiden hyötysuhdetta voidaan parantaa entisestään sähkötoimilaitteiden määrää kasvattamalla, mikä puolestaan vaatii joidenkin ongelmien ratkaisua. Alalla tehty tutkimustyö ja kehitys hyödyttävät myös muita teollisuudenaloja ja tarjoavat valmiita, toimivia ratkaisuja niille.

Sarlioglu et al. käyvät läpi tutkimuksessaan hydraulisten järjestelmien sähköistämistä ytimekkäästi. Aihetta käsittelevät myös Alle et al. artikkelissaan [2]. Vaihtoehtoisiksi täysin hydrauliselle järjestelmälle artikkeleissa kerrotaan sähköhydrauliset toimilaitteet (electro-hydraulic actuators, EHA) sekä sähkömekaaniset toimilaitteet (electromechanical actuators, EMA). Alle et al. laatimassa artikkelissa mainitaan lisäksi integroidut toimilaitteepaketit (integrated actuator package, IAP), jotka eroavat sähköhydraulisista toimilaitteista ainoastaan hydraulisen tehon tuoton näkökulmasta. Sähköhydrauliset toimilaitteet ovat käytännössä pieniä paikallisia hydraulijärjestelmiä, joissa jokaisessa on oma kaksisuuntainen hydraulipumppu, sylinteri ja pieni hydraulisäiliö. Niitä käytettäessä voidaan teho tuoda toimilaitteelle sähköisesti, jolloin koko koneen kattavasta letkujärjestelmästä ja suuresta säiliöstä voidaan luopua. IAP-järjestelmät eroavat EHA-järjestelmistä siten, että IAP:ssä hydraulipumppua pyörittää yhteen suuntaan pyörivä sähkömoottori ja virtauksen suunnanmuutokset hoidetaan nollakulman yli menevällä pumpulla, kun taas EHA:ssa sähkömoottoria voidaan käyttää molempiin suuntiin. Ero on niin pieni, että tässä työssä niitä ei eritellä, vaan käsitellään molempia termillä sähköhydraulinen toimilaitte. Yleisesti niiden eduksi mainitaan tavanomaiseen hydraulijärjestelmään verrattuna lyhentyneet huoltoajat, koska yksittäinen toimilaitteepaketti on helppo vaihtaa ja kytkeä, sekä pienempi tehontarve, sillä se tarvitsee tehoa vain, kun toimilaitetta on tarve käyttää ja muulloin laitteiston sisäinen paine pitää toimilaitteen paikallaan. Heikkoutena vastaavasti on taajuusleveyden (frequency width) sekä jäykkyyden laskeminen. Sähkömekaaniset toimilaitteet puolestaan käyttävät sähkömoottoria, jonka tuottama pyörivä liike muutetaan lineaariseksi vaihteiston ja kuularuuvien avulla. Koska tehoa ei tarvitse välissä muuttaa hydrauliseksi, saadaan sähkömekaanisilla toimilaitteilla parempi hyötysuhde ja vältetään vuotojen uhalta. Sähkömekaanisten toimilaitteiden merkittävimpiä heikkouksia on kuitenkin mekaanisen jumiutumisen uhka. [37, 2]

Hydraulikomponenttien vaihtaminen sähköisiksi on vaihtotyötä ajatellen yksinkertaista, sillä sähköjohtojen reitittäminen on helpompaa, kuin hydrauliletkujen tai -putkien. Sainio et al. toteavatkin tutkimuksessaan [35], että hydrauliletkujen tilantarve on jopa viisinkertainen verrattuna kaapelointiin. Ero on tutkimuksen mukaan vielä suurempi, kun huomioidaan letkujen jäykkyys ja pienin mahdollinen taivutussäde. Sainio et al. huomauttavat, että letkut voidaan korvata putkilla ja johdot virtakiskoilla, mutta hydrauliputketkin vaativat tilaa ja melko suuren taivutussäteen virtauksen laadun ylläpitämiseksi. nVent-nimisen yhtiön sivuilla [31], Sainio et al. mukaan [35], kerrotaan virtakiskoja käytettävän yleensä jäykissä rakenteissa tehoelektroniikassa. Niillä saadaan aikaan tiukkojakin kään-

nöksiä johtimeen, mutta ongelmana on sähkömagneettinen yhteensopivuus sekä sähkökemialliset reaktiot johtimen pinnalla. Näistä syistä johtimet tulee pinnoittaa hyvin. Sainio et al. toteavat tutkimuksessaan [35] myös, että sähkömoottoreilla on yleensä korkeampia maksiminopeuksia, mutta matalampia maksimimomentteja keskimäärin. Tästä syystä heidän mukaansa usein tarvitaankin jonkinlainen vaihteisto sähkömoottorin yhteyteen. Usein ongelmaksi muodostuu tällöin tilan puute.

### 3. TOIMINNOT JA TOIMILAITTEET

Tässä luvussa kerrotaan LT120E:ssä olevien toimintojen toiminnasta ja käytöstä. Osa niistä on hydraulisia, mutta paremman kokonaiskuvan takaamiseksi kerrotaan myös valmiiksi sähköisistä toiminnoista. Lisäksi pohditaan, voisiko hydrauliset toimilaitteet korvata sähköisillä ja mitä toimenpiteitä se vaatisi. Tässä luvussa lasketaan myös toimilaitteilta vaadittuja voimia, mutta valittavat komponentit käsitellään seuraavassa luvussa. Aluksi käydään läpi kaikki vakiona olevat toiminnot ja sen jälkeen optiot.

#### 3.1 Tela-ajo

LT120E:ssä tela-ajo on toteutettu siten, että kumpaakin telaa pyörittää oma hydraulimoottori, joka on kytketty telavaihteeseen. Vaihteen toisella puolen on telapyörä, joka liikuttaa telaketjuja pyöriessään [15]. Näin ollen tela-ajo on periaatteessa helppo muuttaa sähköiseksi vaihtamalla hydraulimoottori sähköiseen. Muutos ei välttämättä vaadi edes telavaihteen vaihtamista, sillä sähkömoottoreita on saatavilla moniin eri tarkoituksiin erilaisilla momentti- ja pyörimisnopeusalueilla. Kuten aiemmin todettiin, laite tärisee prosessin aikana leukamurskaimen toimintaperiaatteesta johtuen. Värähtelyä ei onneksi tarvitse huomioida telojen moottoreita valitessa, koska laitetta ei liikuteta murskauksen aikana, ja murskauksen ajaksi laite lukitaan paikalleen telavaihteessa olevalla jarrulla [15]. Näin ollen heilunta ei välity moottoreille asti.

Jotta sopivaa vaihtoehtoja toteutusta olisi mahdollista tutkia, täytyy moottorilta vaadittavat ominaisuudet selvittää. LT120E:n hydraulikaaviosta saadaan selville nykyisellä kokoonpanolla telapyörältä saatava maksimimomentti 76 kNm [12]. Telavaihteen hyötysuhdetta ei ole saatavilla, mutta Tampereen teknillisen yliopiston vanhan kurssin Sähkömoottorikäytöt luentomonisteessa olevan taulukon [34] avulla voidaan arvioida tyypillisen ketjuvälityksen hyötysuhteen olevan 0,97-0,98. Valitaan välityksen hyötysuhteeksi 0,97. Välityssuhde hydraulimoottorilta telastoon on 147 [12], ja moottorilta vaadittu momentti saadaan selville kaavasta

$$M_m = \frac{M_{tp}}{i * \eta_v} \quad (1)$$

jossa  $M_{tp}$  on telapyörän maksimimomentti,  $\eta_v$  on ketjuvälityksen hyötysuhde,  $i$  on telavaihteen välityssuhde ja  $M_m$  on moottorilta vaadittu momentti. Suurinta momenttia vaaditaan liikkeellelähdössä, ja nopeuden kasvaessa tarve laskee. Vaadittu momentti on siis kaavan 1 perusteella

$$\frac{76 \text{ kNm}}{147 * 0,97} \sim 0,53 \text{ kNm}$$

eli noin 530 Nm. Vaadittava pyörimisnopeus puolestaan saadaan selville laitteen maksiminopeuden, eli telapyörän ratanopeuden, avulla. Ratanopeus on maksimissaan 1 km/h hydraulikaavion mukaan [12], ja telaston halkaisija on 861 mm, joten säde on 430,5 mm [29]. Tällöin telapyörän kulmanopeus  $\omega_t$  saadaan kaavasta

$$\omega_t = \frac{v}{r} \quad (2)$$

jossa  $\omega_t$  on telapyörän kulmanopeus,  $v$  on ratanopeus ja  $r$  säde. Moottorin kulmanopeus saadaan vastaavasti kertomalla telapyörän kulmanopeus välityssuhteella, eli

$$\omega_m = \omega_t * i \quad (3)$$

jossa  $\omega_m$  on moottorin kulmanopeus. Moottorin pyörimisnopeus puolestaan saadaan kaavasta

$$n_m = \frac{\omega_m}{2 * \pi} \quad (4)$$

jossa  $n_m$  on pyörimisnopeus. Moottorilta vaadittu pyörimisnopeus voidaan siis laskea muokkaamalla arvoja sopivammiksi ja yhdistämällä yhtälöt 2-4 seuraavasti

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{\omega_m}{2 * \pi} = \frac{\omega_t * i}{2 * \pi} = \frac{\frac{v}{r} * i}{2 * \pi} = \frac{v * i}{2 * \pi * r} = \frac{1 \frac{km}{h} * 147}{2 * \pi * 430,5 mm} \\ &= \frac{16,66 \dots \frac{m}{min} * 147}{2 * \pi * 0,4305 m} \sim 905,8 rpm \end{aligned}$$

eli noin 900 rpm. Korvaavan moottorin on siis kyettävä tuottamaan suuri momentti suhteellisen matalalla pyörimisnopeusalueella.

Abad esittää kirjassaan kattavasti sähkömoottoreiden ja -komponenttien soveltuvuutta ajovoimansiirtoon erilaisiin sähkö- ja hybridiajoneuvoihin [1]. Hänen mukaansa kolme parasta vaihtoehtoa ovat avonapainen kestopagneettimoottori (interior permanent magnet motor, IPM-moottori), oikosulkumoottori (induction motor, IM) ja vaihtoreluktanssimoottori (switched reluctance motor, SRM).

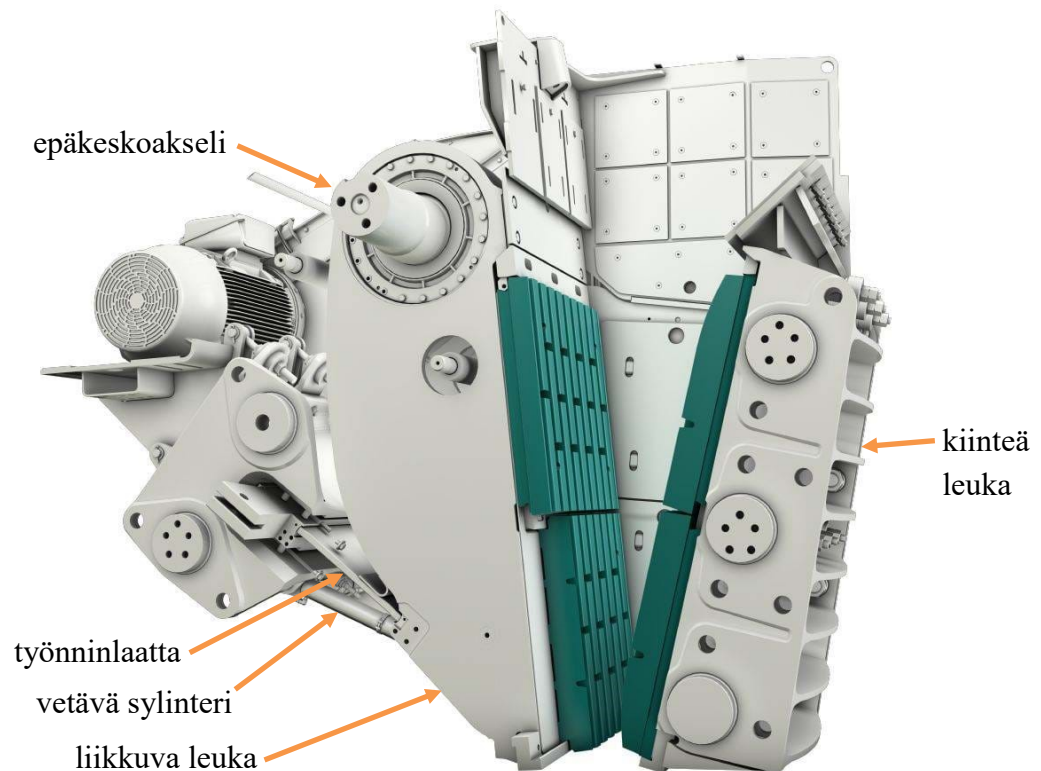
Viimeksi mainittu SRM on toiminnaltaan samankaltainen, kuin askelmoottori. Abadin mukaan sitä käytettäessä esiintyy momentin värähtelyä, ja rakenteensa takia se vaatii hienostunutta ohjausteknologiaa. Toisaalta sillä on luonnostaan suuri tehotehokkuus, se ei lämpene kovin paljoa ja sekä materiaali että tuotantokustannukset ovat matalat. Momentin vaihtelun takia SRM soveltuu kuitenkin parhaiten käytettäväksi laitteissa, joita ajetaan suurilla nopeuksilla. Koska LT120E:n ajonopeus on pieni, ei SRM ole välttämättä paras mahdollinen vaihtoehto. [1]

IPM-moottori on rakenteeltaan reluktanssiaskelmoottori, jonka roottorin sisälle asennetaan kestopagneetteja. Tällöin se hyödyntää toiminnassaan sekä reluktanssista että magneettikentästä syntyvää momenttia. Sillä on Abadin mukaan erinomainen hyötysuhde ja pieni momentin vaihtelu, lisäksi sillä on suuri maksimimomentti. Optimaalinen toiminta saavutetaan käyttämällä mahdollisimman vahvasti magneettista materiaalia roottorissa. Kestomagneettien hinnoissa on kuitenkin olemassa riski, sillä esim. vuonna 2012 jopa 97 % vahvasti magneettisista materiaaleista tuli Kiinasta, jonka vientipolitiikka johti moottoreiden jo valmiiksi korkean hinnan nousuun [40]. Vaikka tilanne onkin muuttunut vuodesta 2012, voidaan aiheen katsoa olevan ajankohtainen edelleen. Lisäksi vaikka IPM-moottorit kykenevät pitämään yllä korkeaa tehotehyyttä ja hyötysuhdetta, niissä esiintyy välillä epätasaisuuksia. IPM-moottori olisi varteenotettava vaihtoehto ajovoimansiirtoon, jos laitteella ajettaisiin paljon. Suurin osa mobiilimurskauslaitoksen toiminnasta on kuitenkin paikallaan oloa, joten hyötysuhteesta saatavat säästöt eivät välttämättä ole riittävä etu korkeaan hankintahintaan suhteutettuna. [1]

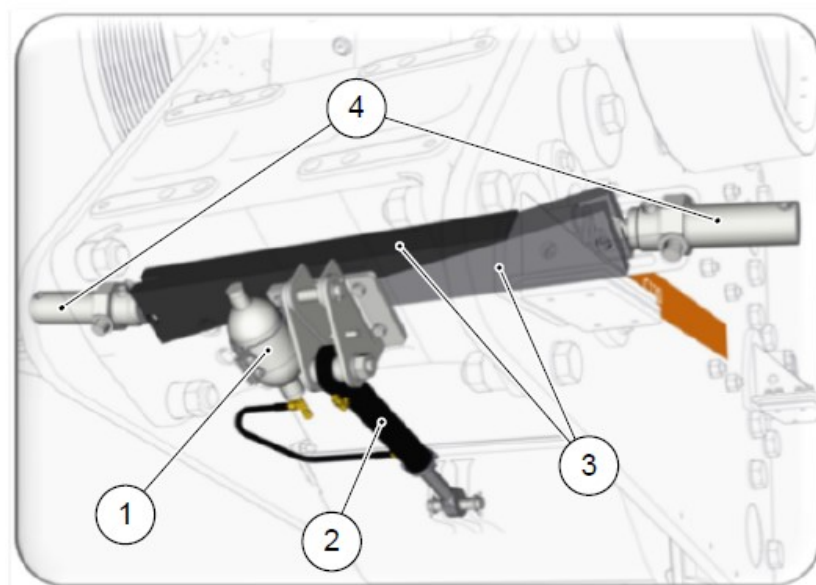
Oikosulkumoottori kehitettiin yli sata vuotta sitten, ja se on eniten käytössä oleva sähkömoottorityyppi tänä päivänä. Abadin mukaan niissä ei enää ole juuri parannettavaa pitkäaikaisen kehityksen takia. Moottorin korkea käynnistysmomentti ja luotettavuus, sekä pieni huollon tarve selittävät suosion. Lisäksi oikosulkumoottori ei tarvitse vaihtosuuntaajaa, vaan ajo on mahdollista suoraan vaihtovirtalähteestä. Sen ominaisuuksia voidaan parantaa hankkimalla kuparinen roottori tyypillisen alumiinisen sijaan. Tämä kasvattaa maksiminopeutta, pienentää lämmöntuottoa ja parantaa käynnistysmomenttia, jolloin myös tehotehyyden nousee. Oikosulkumoottorin tehotehyyden ei ole aivan yhtä hyvä, kuin IPM moottorin, mutta hankintahinta on matalampi. [1]

### 3.2 Murskaimen asetuksen säätö

Leukamurskaimen toimintaperiaate on kuvattu Metson nettisivuilla näin: ”Nordberg C -sarjan leukamurskaimet ovat yläosastaan yhdellä nivelellä toteutettuja esimurskaimia. Syötemateriaali murskautuu kiinteän ja liikkuvan leuan välissä. Liikkuva leuka kiinnitetään heiluriin. Heilurin liike (=kinematiikka) perustuu epäkeskoakselin epäkeskisyyteen ja työnninlaatan painelevyn kulmaan.” [22]. Kuva 4 ja Kuva 5 auttavat myös ymmärtämään toimintaperiaatetta. Työnninlaatta on siis kiinni liikkuvan leuan alapäässä ja leukamurskaimen tuotteen kokoa saadaan muutettua siirtämällä työnninlaattaa kohti, tai pois päin kiinteästä leuasta, jolloin myös liikkuvan leuan alaosa siirtyy. Laattaa liikutetaan kahden kolmioprofiilisen kiilan avulla, jotka kulkevat limittäin. Kun sylinterit työntävät kiiloja toisiaan kohti, niiden yhteislevyys kasvaa ja laatta liikkuu kiinteää leukaa kohti. Niitä toisistaan pois päin vedettäessä työnninlaatta vastaavasti liikkuu pois päin kiinteästä leuasta. Kumpaakin kiilaa liikuttaa yksi sylinteri ja kolmas sylinteri vetää työnninlaattaa kiiloja kohti, jotta pakka pysyy kasassa. [13]



**Kuva 4.** C-sarjan murskaimen pääosat [23].

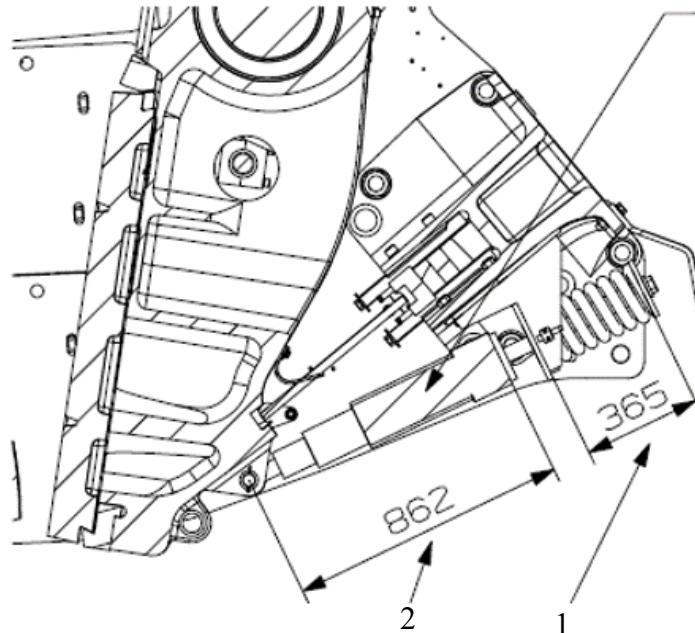


**Kuva 5.** Murskaimen asetuksen säätöä havainnollistava kuva. Paineakku (1) pitää paineen pitosylinterillä (2) vetäen työnninlaattaa kiiloja (3) kohti. Säätö tapahtuu säätösylintereillä (4). [15]

Asetuksen säädön sähköistämistä mietittäessä on tärkeää ottaa tärinä huomioon. Murskaimen leuka liikkuu nopeasti edestakaisin prosessin aikana, ja leualla sekä epäkeskoakselilla on suuri hitausmomentti. Tärinä ei vaikuta kiiloja liikuttaviin sylintereihin kovin

merkittävästi, koska työninlaatta pitää kiiloja paikallaan, jolloin ne eivät pääse heilumaan murskaimen ollessa käynnissä. Sylinterien kiinnitys myös sallii pienen liikkeen varteen nähden kohtisuorassa suunnassa, koska ne on kiinnitetty nivelletysti varren juuresta. Näin ollen mekaaninen välitys ei kuormittuisi huomattavasti sivuilta, joten sähkösylinteri olisi toimiva vaihtoehto. Vetävä sylinteri puolestaan vastaanottaa paljon rasitusta akselinsa suunnassa, koska sen tehtävä on vetää liikkuvaa leukaa kiiloja vasten. Hydraulinen järjestelmä sopii tähän tarkoitukseen hyvin, koska edestakainen liike ja värinä ei haittaa sitä. Heiluriliikkeen takia muodostuvaa ylipainetta saadaan päästettyä paineenrajoitusventtiilillä pois, ja alipainetta kompensoidaan paineakulla. Hydraulisen järjestelmän heikkoutena on sen tarve ylläpitää painetta koko ajan, jotta asetus säilyy haluttuna. Kun asetuksen säätö toteutettiin vielä mekaanisesti vanhoissa murskaimissa, vetävä sylinteri oli korvattu kierretapilla, jossa jousi veti laattaa kiiloja päin. Tällöin jousi piti jännityksen itsestään ilman lisätyötä. Sama tekniikka toimisi edelleenkin, mutta säädöstä on haluttu tehdä yksinkertaisempaa hydraulisella järjestelmällä, jolloin napin painallus riittää.

Sähköinen vaihtoehto vetävälle sylinterille on jo kehitteillä, ja ehdotus on esitetty Kuva 6. Mekanismi on suunniteltu LT106-leukamurskainlaitokselle, mutta sitä voidaan käyttää myös LT120E:ssä, koska toimintaperiaate on sama. Siinä sähkösylinteri (kuvassa nro 2) muuttaa murskaimen asetusta, kuten aiemminkin, ja jousen (1) säätö muuttuu samalla. Sensori lukee sylinterin pituutta ja automaatio pyrkii säätämään jousen pituutta niin, että sen jännitys pysyy mahdollisimman samana asetuksesta riippumatta. Murskaimen käytössä sylinterin pituus ei muutu, ja jousi vaimentaa etäisyyden muutoksista johtuvaa värähtelyä niin, ettei se välity sylinterille. [10]



**Kuva 6.** Ehdotus sähköisestä asetuksen säädöstä, jossa jousi (1) vetää sylinteriä (2) pitäen paketin kasassa murskauksen aikana. Sylinterin (2) pituutta muutetaan haluttaessa vaihtaa asetusta. [10]

Sähköisten toimilaitteiden mitoitusta varten täytyy laskea sylintereiltä vaadittu voima kummassakin käytössä. Kiilasynterien tapauksessa sylinteriltä vaaditun voiman laskeminen on hankalaa, sillä siihen vaikuttaa mm. kiilojen välinen kitka, kiilojen kitka muiden pintojen kanssa, vetosylinterin aiheuttama voima ja sen välittyminen kiiloille sekä murskaimen toiminnan aiheuttama voima. Vaadittu voima olisi myös selvitettävissä mittamalla esimerkiksi sitä suoraan tai sylintereissä vallitsevaa painetta toiminnassa olevasta murskaimesta. Mittaaminen ei kuitenkaan onnistunut tätä työtä tehtäessä, mutta onneksi voima voidaan laskea kohtuullisella tarkkuudella tuotettuna hydraulisena maksimivoimana. Tämä voidaan laskea kaavasta

$$F = pA \quad (5)$$

jossa  $F$  on hydraulinen voima,  $p$  on paine ja  $A$  pinta-ala, johon paine vaikuttaa. Ala saadaan laskettua hydraulisynterin tiedoista. Männän puolella se on ympyrän alan kaava, eli

$$A = \pi r^2 \quad (6)$$

jossa  $A$  on pinta-ala ja  $r$  ympyrän säde. Sylinterin varren puoleinen ala taas saadaan laskettua vähentämällä männän alasta varren poikkipinta-ala. Järjestelmässä vallitseva painetaso on 25 MPa, 100/56x250 sylinterin männän säde on 0,05 m ja varren säde 0,028 m. Yhdistämällä kaavat 5 ja 6 saadaan sylinterin työntöliikkeen tuottamaksi voimaksi

$$F = pA = p\pi r^2 = 25 * 10^6 \text{ Pa} * \pi * (0,05 \text{ m})^2 \sim 196349,5 \text{ N}$$

eli noin 196,3 kN. Vastaavasti sylinterin vetoliikkeen tuottama voima on

$$F = pA = 25 * 10^6 \text{ Pa} * (\pi * (0,05 \text{ m})^2 - \pi * (0,028 \text{ m})^2) \sim 134774,3 \text{ N}$$

eli noin 134,8 kN. Iskun pituus pysyy samana, ja varren paksuuden voidaan myös olettaa riittävän estämään nurjahdukset.

Vetosylinterin mitoitus voidaan yhtä lailla toteuttaa vanhan hydraulisynterin tuottaman voiman mukaan, näin se riittää varmasti. Vanhan sylinterin mitat ovat 80/50x350, näin ollen sen männän säde on 0,04 m ja varren 0,025 m. Vallitseva painetaso taas pidetään paineakun avulla 13,5-15,5 MPa välillä, joten käytetään 15,5 MPa. Laskennassa käytetään yllä esiteltyä kaavojen 5 ja 6 yhdistelmää. Työntöliikkeen voimaa on tarpeetonta laskea, sillä sylinterin ainoa tehtävä on vetää työnninlaattaa säätökiiloja vasten. Vetoliikkeen voima sen sijaan on

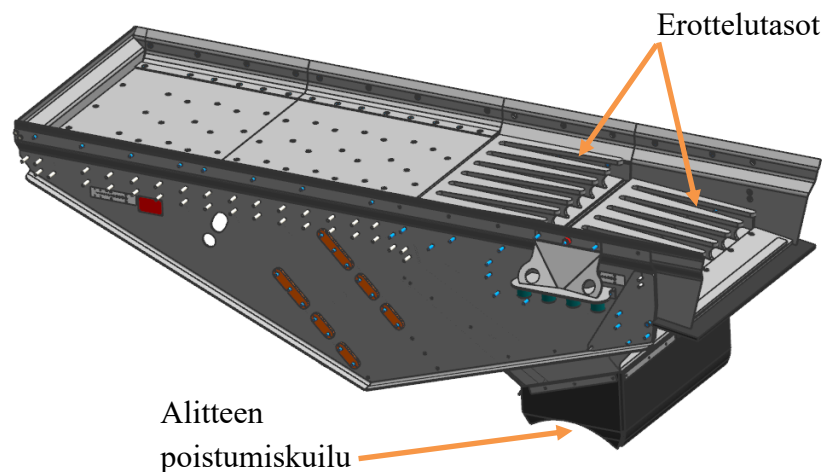
$$F = pA = 25 * 10^6 \text{ Pa} * (\pi * (0,04 \text{ m})^2 - \pi * (0,025 \text{ m})^2) \sim 47477,3 \text{ N}$$

eli noin 47,5 kN. Iskun pituus ja varren paksuus pysyvät samoina.

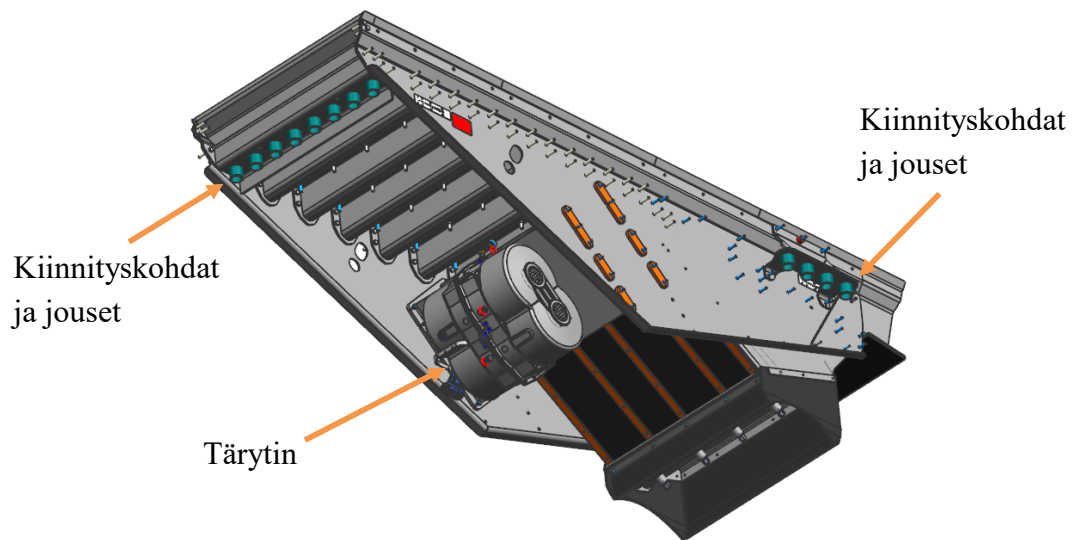


### 3.3 Syötin

LT120E laitteeseen tuleva materiaali ohjataan ensin syöttimeen, joka erottelee murskaimeen menevän ja prosessin ohi päästettävän materiaalin toisistaan. Erottelutasona voidaan käyttää esim. tasapitkin välein järjestettyjä pitkittäisiä teräspalkkeja, kuten Kuva 7. Väleistä mahtuva materiaali (alite) on turhan pientä murskattavaksi, joten se ohjataan ohi prosessista poistumiskuilun kautta. Erottelua tehostetaan hydraulisella täryttimellä, joka sijaitsee syöttimen alla. Se saa koko syöttimen tärisemään, jolloin materiaali liikkuu eteenpäin ja levittäytyy tasaisemmin. Täryttimen toiminta on hyvin yksinkertainen: moottori pyörittää puolipyörän muotoisia, samassa tahdissa liikkuvia kiekkoja. Koska ne eivät ole symmetriset akselinsa suhteen, painopiste ei sijaitse akselin keskellä ja niiden pyörimys saa aikaan värinää. Samaa tekniikkaa käytetään mm. pelikonsolien ohjaimissa, huomattavasti pienemmässä mittakaavassa tosin. Jotta värähtely ei välittyisi muualle koneeseen, syötin kiinnitetään jousituksen päälle laitteen runkoon. Tärytin ja kiinnityskohdat sekä jouset on esitetty Kuva 8. Erottelu syöttimellä on kannattavaa, sillä liian pienen materiaalin kasaantuminen murskaimeen voi aiheuttaa sen tukkeutumisen [15]. Tällöin murskain täytyy pysäyttää ja tyhjentää, mikä vie aikaa ja työllistää koneen käyttäjää turhaan.



**Kuva 7.** Syöttimen päällä olevat palkit erottelevat materiaalia. Tätä kutsutaan erottelutasoksi. Alite ohjataan poistumiskuiluun. [26]



**Kuva 8.** Syöttimen alla näkyy tärytin ja kiinnityskohtia, joista syötin asennetaan LT:n runkoon. Välissä olevat jousitukset vaimentavat värähtelyn siirtymistä laitteen runkoon ja saavat syöttimen ”kellumaan”. [26]

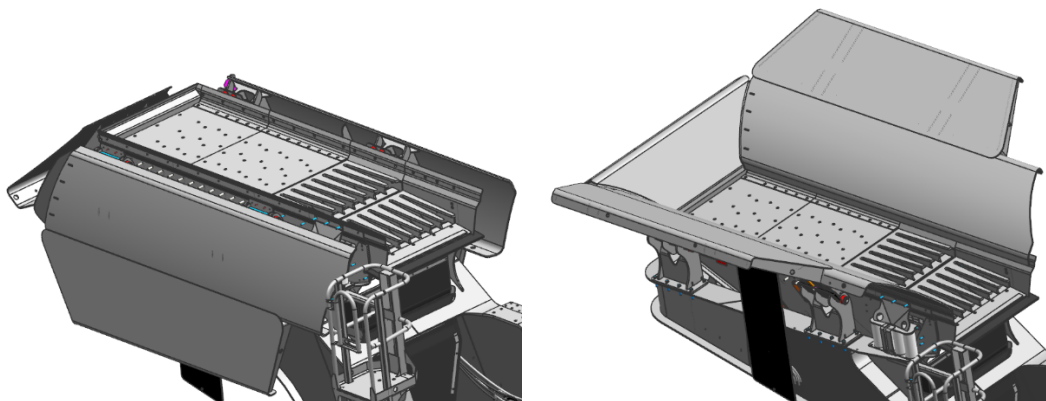
Ongelmana hydraulikäyttöisessä syöttimessä LT120E:ssä on öljyn lämmittäminen. Metso Metricsistä saadun datan mukaan laitteita on myyty lähinnä Pohjois-Eurooppaan, jolloin niitä luultavimmin käytetään myös kylmissä olosuhteissa. Koska LT120E:ssä ei juuri ole prosessin aikaisia hydraulitoimintoja syöttimen lisäksi, saattaa kestää kymmeniä minutteja ennen kuin syötin alkaa toimia kunnolla kylmissä olosuhteissa [33]. Hydraulikäytön etuna puolestaan on se, että syöttimen jarrutuksen järjestäminen on helpompaa [33]. Prosessin pysähtyessä olisi toivottavaa, ettei syöttimeltä tulisi enempää materiaalia murskaimeen, jotta murskain voidaan käynnistää ilman tyhjennystä. Ilman minkäänlaista jarrutuslaitteistoa syötin jäisi tärisemään pitkäksi aikaa suuren liikemäärän takia, jolloin myös tuote kulkeutuu sitä pitkin eteenpäin. Hydraulisessa laitteistossa jarrutus voidaan toteuttaa esim. asentamalla kuristusventtiili moottorin jälkeen paluulinjaan. Venttiili voitaisiin aktivoida sammutuksen yhteydessä, jolloin se alkaisi tuottaa vastapainetta paluulinjaan ja moottori hidastuisi. Sähköiseen versioon jarrutus täytyisi käytännössä tuottaa taajuusmuuttajalla, jolloin syöttimen nopeutta saataisiin hidastettua ohjaamalla moottoreiden magneettikenttiä oikein. Taajuusmuuttaja on toimiva ratkaisu, mutta hintava verrattuna esimerkiksi kuristusventtiiliin, minkä lisäksi se vie tilaa huomattavasti enemmän. [30]

Metso valmistaa myös sähkötoimisia syöttimiä tällä hetkellä, joten sähköisen toteutuksen ei pitäisi olla ongelma. Metson NW-sarjan murskainvaunulaitokset ovat käytännössä rekan vaunun alustan päälle rakennettuja vedettäviä murskauslaitoksia, joissa ei ole omaa dieselmoottoria. Tästä johtuen kaikki toiminnot ovat sähköisiä [24]. Esimerkiksi NW120-laitokseen, jossa on sama murskain kuin LT120E:ssä, tulee lähes saman kokoinen syötin [32, 36]. Sen liikkeen tuottaa kaksi Invictan valmistamaa, n. 6 kW sähköistä tärytintä.

Samoja moottoreita voitaisiin käyttää LT120E:ssä tekemällä pieniä muutoksia rakenteseen, mm. muuttamalla kiinnityksiä ja kiinnityslevyä. Täryttimien koko on hieman suurempi sähkö- kuin hydrauliversiossa, mutta syöttimen alla tilaa on riittävästi.

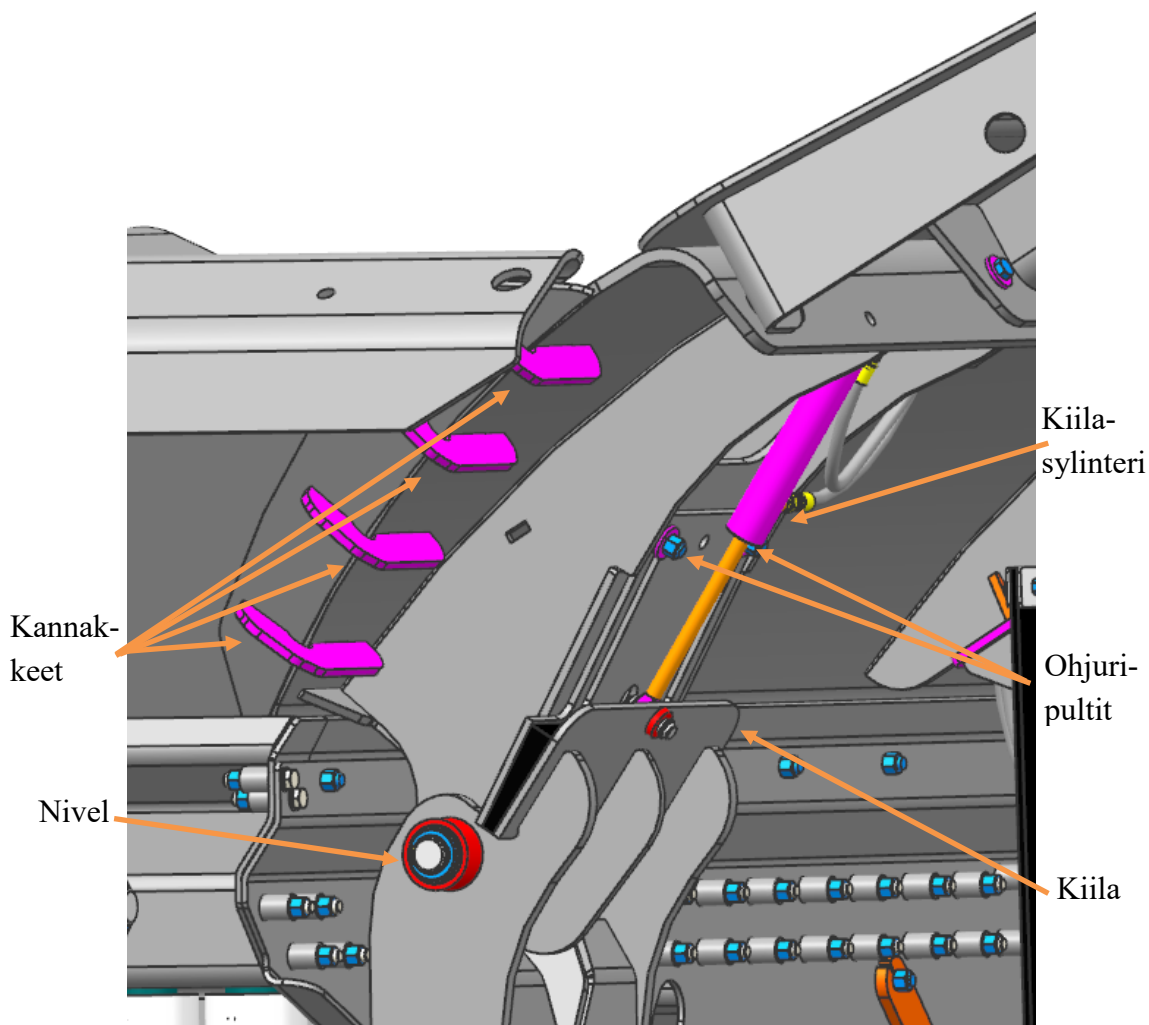
### 3.4 Syöttimen laidat

LT120E:n syöttimen ympärille asennetaan laidat, jotta syöte ei pääse tippumaan reunojen yli aiheuttaen vaaratilanteita. Laidat täytyy kuitenkin voida laskea alas, jotta valmis laite mahtuu tavallisiin kuljetusmittoihin. Laitteeseen on saatavana myös optiona pidennetyt laidat, jotka suojaavat ympäristöä kiviltä paremmin. Korkeammat laidat näkyvät Kuva 9. Nostoa ja laskua varten laidat on nivelletty juuresta ja kiinnitetty sylintereihin, joita ohjataan käsiohjatuilla hydrauliventtiileillä. Jokaiselle laidalle on oma venttiilinsä ja viipunsä, joten teoriassa koneen käyttäjä voisi itse määrittää niiden korkeuden. Turvallisuuden takia laidat täytyy kuitenkin lukita erillisillä sylintereillä, mikä onnistuu vain laitojen ollessa aivan yläasennossa.



**Kuva 9.** Vasemmalla syöttimen laidat ovat kuljetusasennossa ja oikealla käyttövalmiina. Pidennetyt laidat näkyvät kuvassa molemmilla sivuilla jatkopaloina. [26]

Laidat altistuvat koville iskuille syöttimeen pudotettavien kivien takia. Toisinaan osa niistä osuu laitoihin, mikä kuormittaa rakennetta. Laitojen sisäpuolelle asennetaan myös pehmeämmästä materiaalista tehtyjä kulutuslevyjä pehmusteiksi suojaamaan syöttimen sisäpintoja. Voimat eivät kuitenkaan välity varsinaisiin sylintereihin lukituskiilojen ansiosta, vaan teräsrakenteet ottavat iskut vastaan. Mekanismi toimii niin, että laidan ollessa yläasennossa kiila työnnetään sylinterin avulla nivelkohdan juureen, kuten Kuva 10 näkyy. Tämä estää kiertoliikkeen ja suojaa näin nostosylinteriä.



**Kuva 10.** Lukitusmekanismi, jossa kiila tukee laitaa ja estää kiertoliikkeen myötäpäivään. Kuva otettu takaapäin, kannakkeet pitävät myös takalaitaa tuettuna, koska sillä ei ole omia kiiloja. [26]

Nosto- ja lukitussylinterien vaihtaminen sähköisiin ei pitäisi olla ongelma, koska ulkoisia voimia ei juuri kohdistu niihin. Kuten Kuva 10 näkyy, kiila on kiinni levyssä, jota kaksi ohjuripulttia puolestaan pitävät vasten runkoa. Ne estävät kiilan tippumisen roikkumaan sylinterin varaan. Pultteja ei kiristetä tiukalle, koska kiilan on voitava liikkua niiden varassa vapaasti. Näin ollen niistä ei aiheudu merkittävää kitkaa. Kiilojen liikkuminen loveensa pitäisi myös olla melko kitkatonta, koska nostosylinterit nostavat laitat riittävän korkealle, eikä kiilojen tarvitse työntää laitaa enää ylemmäs. Näin ollen sylinterin täytyy lähinnä kyetä liikuttamaan kiilan massaa. Sen työntäminen alas tapahtuu painovoimaavusteisesti ja vaatii näin vain vähän työtä sylinteriltä. Mitoitetaan ne siis noston, eli vetoliikkeen, vaatiman voiman mukaan. Nosto ei tapahdu kohtisuoraan ylöspäin, mutta koska kulma on pieni, sylinteri voidaan ”ylimitoitaa”. Vaadittu voima saadaan kaavasta

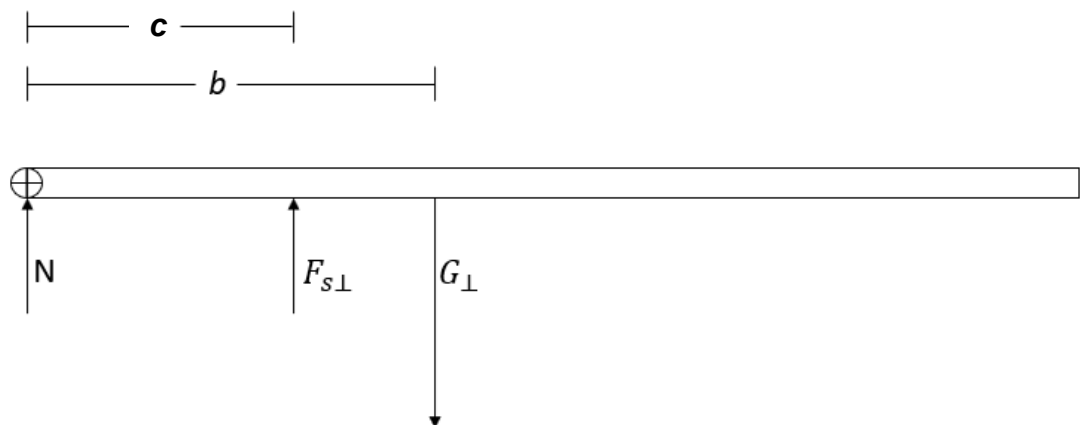
$$F = ma \quad (7)$$

jossa  $F$  on voima,  $m$  on kappaleen massa ja  $a$  kappaleen kiihtyvyys. Koska ainut kiilan liikettä vastustava merkittävä voima on painovoima, kiihtyvyydeksi voidaan laittaa puotamiskiihtyvyys  $g$ , jonka suuruus on noin  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Kiilan massa puolestaan on noin  $19,5 \text{ kg}$ . Tällöin yhtälöstä 7 saadaan tulokseksi

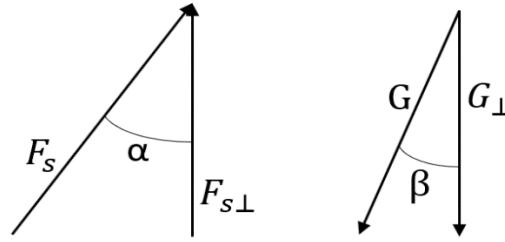
$$F = ma = 19,5 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 191,295 \text{ N}$$

eli noin  $191 \text{ N}$ . Riittävän pienen sylinterin löytäminen voi olla vaikeaa, mutta pieni ylimittaus ei varsinaisesti haittaa myöskään. Suuremmat sylinterit ovat toki yleensä kalliimpia, mutta tässä tapauksessa liikutaan valikoiman alkupäässä joka tapauksessa.

Nostosylinterien mitoituksessa täytyy laskea laitoihin vaikuttava tukivoima sylinterin toimesta. Sylinterit täytyy tietenkin mitoittaa niin, että ne jaksavat nostaa myös lisälaidat. Kuva 11 esittää vapaakappalekuvaa laidasta jatkopalan kanssa. Se on selkeyden vuoksi piirretty vaakatasoon, ja siihen vaikuttavat nivelen tukivoima  $N$ , sylinterin tuottaman voiman  $F_s$  kohtisuora komponentti  $F_{s\perp}$  sekä painovoiman  $G$  kohtisuora komponentti  $G_{\perp}$ . Painovoima vaikuttaa luonnollisesti koko kappaleeseen, mutta sen voidaan esittää vaikuttavan kappaleen massakeskipisteeseen. Koska laita on painavampi, kuin jatko-osa, massakeskipiste ei ole keskellä vaan lähempänä niveltä. Etäisyys  $c$  puolestaan on mitta nivelestä sylinterin kiinnityskohtaan, eli  $211 \text{ mm}$  ja  $b$  nivelestä massakeskipisteeseen, eli  $657 \text{ mm}$ . Lisäksi laidan massa  $m$  on  $1545 \text{ kg}$ . Sylinterin voima ja painovoima komponentteineen on esitetty vielä erikseen Kuva 12, jossa kulma  $\alpha$  on sylinterivoiman ja laitaa nähdessä kohtisuoran komponentin välinen kulma ja  $\beta$  vastaavasti painovoiman ja kohtisuoran komponentin välinen kulma.



**Kuva 11.** Vapaakappalekuva syöttimen laitaan vaikuttavista voimista.



**Kuva 12.** Syöttimen laitaan vaikuttavat sylinterin voima ja painovoima komponentteineen.

Sylinterivoiman laskemista hankaloittaa se, että laidan kääntyessä painovoiman ja sylinterivoiman suunta muuttuu, ja sylinteri kääntyy myös laitteen rungon suhteen. Aloitetaan kuitenkin määrittelemällä laitaan vaikuttavat momentit. Koska se ei liiku, siihen vaikuttavien momenttien summa on nolla, eli

$$\Sigma M = 0 \quad (8)$$

ja toisaalta momentti saadaan lausuttua toisessa muodossa

$$M = F * r \quad (9)$$

jossa  $M$  on momentin suuruus,  $F$  voima ja  $r$  voiman varren pituus. Jos lasketaan laitaan vaikuttavat momentit nivelen ympäri, saadaan kaavojen 8 ja 9, ja vapaakappalekuvan avulla kaava muotoon

$$\Sigma M = 0 \Leftrightarrow F_{s\perp} * c - G_{\perp} * b = 0 \Leftrightarrow F_{s\perp} * c = G_{\perp} * b$$

Voimien komponentit  $F_{s\perp}$  ja  $G_{\perp}$  voidaan myös lausua toisin kosinin avulla

$$\cos\alpha = \frac{F_{s\perp}}{F_s} \Leftrightarrow F_{s\perp} = F_s * \cos\alpha, \quad G_{\perp} = G * \cos\beta$$

jolloin edeltävä lauseke saadaan muotoon

$$F_{s\perp} * c = G_{\perp} * b \Leftrightarrow F_s * \cos\alpha * c = G * \cos\beta * b \Leftrightarrow F_s = G * \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} * \frac{b}{c}$$

Tästä huomataan, että maksimivoima saadaan lausekkeesta silloin, kun  $\frac{\cos\beta}{\cos\alpha}$  saa suurimman arvonsa, koska muut muuttujat pysyvät vakiona. Jakolaskun osamäärä kasvaa jakajan pienentyessä ja jaettavan suurentuessa. Toisaalta kosinilausekkeen arvo on yksi, kun kulma on nolla, ja sen kasvaessa lähemmäs 90 astetta, lausekkeen arvo lähestyy nollaa. Suurin arvo saadaan siis tilanteessa, jossa kulma  $\alpha$  on mahdollisimman lähellä suoraa kulmaa ja  $\beta$  nollakulmaa. Kokeilemalla havaittiin, että sylinterivoiman suurin arvo saadaan kuitenkin laidan ollessa ala-asennossa. Tällöin kulma  $\alpha$  on  $62^\circ$  ja  $\beta$  vastaavasti  $60^\circ$ ,

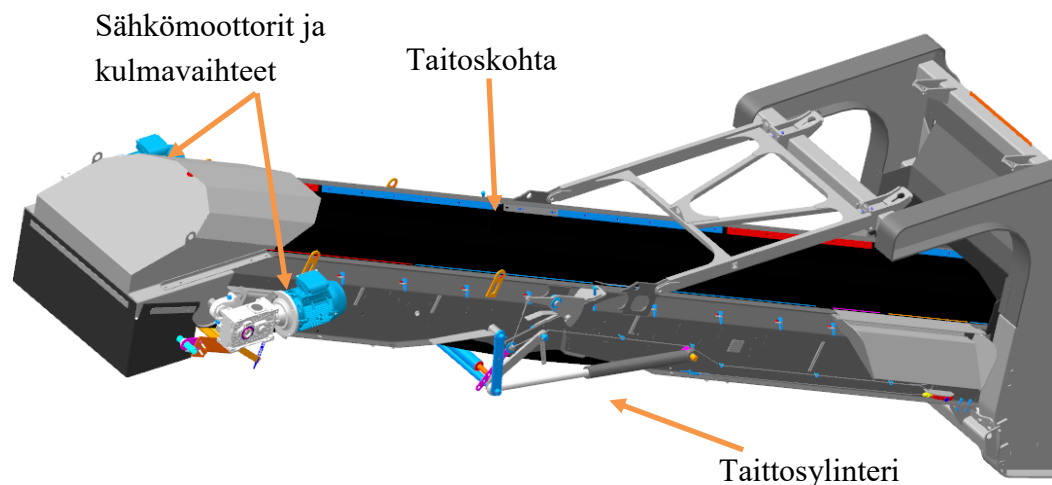
ja painovoima  $G$  saadaan lausuttua laidan massan  $m$  ja putoamiskiihtyvyyden  $g$  (arvo  $9,81 \text{ m/s}^2$ ) avulla kuten kaavassa 7. Sylinterin voimaksi saadaan

$$F_s = m * g * \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} * \frac{b}{a} = 1545 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \frac{\cos 60^\circ}{\cos 62^\circ} * \frac{657 \text{ mm}}{211 \text{ mm}} \sim 50262,2 \text{ N}$$

eli noin 50 kN.

### 3.5 Pääkuljetin

Pääkuljetin siirtää murskaimesta tulevaa materiaalia prosessissa eteenpäin. Sen toimintaperiaate on melko yksinkertainen. Kuljettimen yläpäähän on kiinnitetty kaksi kulmavaihteella varustettua 11 kW sähkömoottoria. Ne pyörittävät kuljettimen sisällä olevaa veto-pyörää, joka puolestaan liikuttaa kuljetinmattoa. Vakiona LT120E:ssä on 12 m pitkä pääkuljetin, mutta siihen on saatavana optiona myös pidempi 16 m pitkä kuljetin. Normaali kuljetin nostaa tuotteen 3,4 m korkeuteen, mutta pidemmällä nostokorkeus on jopa 4,6 m. Tällöin se voidaan nostaa suoraan esimerkiksi toisen Lokotrack-murskauslaitoksen syöttötimeen. Option kanssa laitteen pituus kasvaa kuitenkin niin suureksi, ettei se mahdu suoraan kuljetusmittoihin. Näin ollen kuljettimesta on tehty taitettava. Taitto tapahtuu kahdella 80/56x830 kokoisella hydraulisyylinterillä, jotka sijaitsevat molemmin puolin kuljetinta. Kuljetuksen aikana kuljettimen loppupää on taitettuna kuljettimen alla. Ennen prosessin käynnistystä kuljetin suoristetaan sylinterien avulla suoraksi. Kuva 13 havainnollistaa eri osia kuljettimessa. [15]

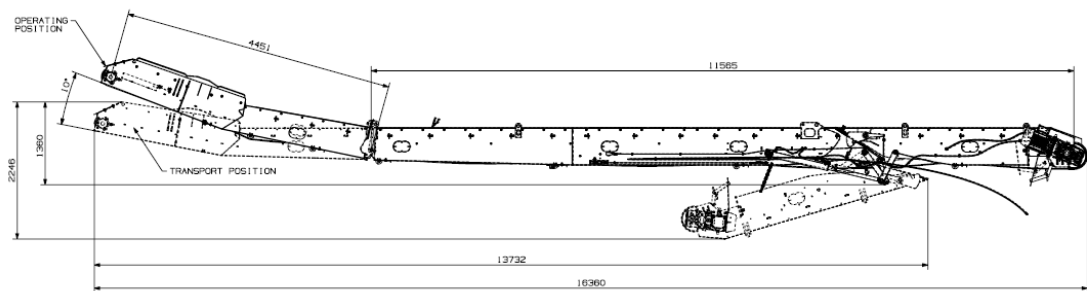


**Kuva 13.** Pidemmän pääkuljettimen ulkoa näkyvä osa. Se jatkuu pitkälle laitteen alle. Taittosylintereitä on yksi molemmin puolin kuljetinta.

Pidemmässä pääkuljettimessa moottorit ovat taittuvassa jatkopalassa, kuten Kuva 13 näkyy. Taittotoiminto on mahdollista muuttaa sähköiseksi, koska kuljettimen loppupää ei altistu merkittävämmille värähtelyille kuin muukaan kone, eikä toimintoa käytetä kovin

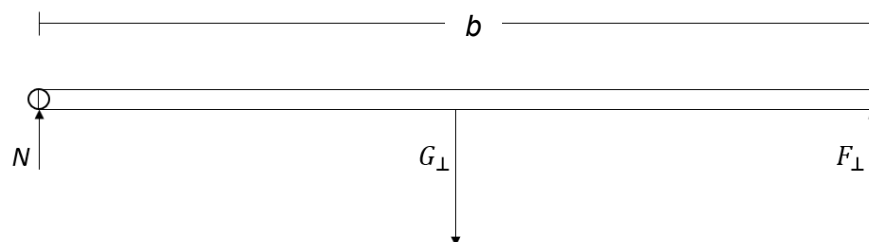
usein. Sylinterit eivät myöskään joudu kannattelemaan kuljettimen loppupään painoa jatkuvasti, sillä taitoskohdassa on mekaaninen lukitus, joka pitää jatko-osan ylhäällä. Aina ongelmana on pitkä iskunpituus ja jatko-osan massa. Erityisesti sähkömoottorit vaihteineen aiheuttavat taitoskohtaan suuren momentin. Sylintereihin ja niveliin kohdistuvista voimista on onneksi suoritettu mittauksia, ja kummaltakin sylinteriltä tiedetään vaadittavan vähintään 92 kN voimaa kuljettimen suoristamiseksi [27].

Pääkuljettimen alkupäätä, joka sijaitsee koneen alla, on myös mahdollista nostaa ja laskea. Näin laitteen maavaraa saadaan parannettua ajon ajaksi, ja kun murskeen tuotanto alkaa, kuljetin voidaan laskea takaisin alas. Tämäkään toiminto ei altistu tärinälle tai muille ulkoisille voimille juurikaan toimintansa aikana. Kuljettimen ollessa käyttöasennossa, eli alhaalla, taipuva osa roikkuu sylinterin varassa. Vastaavasti kun kuljetin nostetaan kuljetusasentoon, sylintereihin jäävä paine pitää sen ylhäällä. Sylinterin jälkeinen letku on tukittu on/off -venttiilillä. Koko pääkuljetin on esitetty Kuva 14, josta nähdään alkupään pituuden olevan 4451 mm ja sen kiertyvän  $10^\circ$ . Lisäksi taipuvan osan massan tiedetään olevan 1090 kg ja että kuljetin on yläasennossa suunnilleen vaakatasossa.



**Kuva 14.** Pidemmän pääkuljettimen tärkeimmät mitat.

Selvitetään kuljetinta liikuttavilta sylintereiltä vaadittu voima samalla tavoin, kuin edellisessä aliluvussa laskettiin syöttimen laitojen sylintereiltä vaadittu voima. Laskuja helpottaa se, että nostosylinterit sijaitsevat aivan kuljettimen alussa ja sylinterit kääntyvät niin vähän, että niiden voidaan olettaa olevan koko ajan pystysuorassa. Kuva 15 esittää vapaakappalekuvaa tilanteesta, siinä  $b$  on kuljettimen taipuvan osan pituus  $N$  on kuljettimen nivelen tukivoima,  $F_{\perp}$  sylinterien tukivoiman ( $F$ ) kuljettimeen nähden kohtisuora komponentti ja  $G_{\perp}$  kuljettimen osan painovoiman ( $G$ ) kohtisuora komponentti.





**Kuva 15.** Vapaakappalekuva kuljettimen alkupäästä.

Kuten edellisessäkin aliluvussa, aloitetaan lausumalla momenttiehto nivelpisteessä. Käytetään kaavoja 8 ja 9, sekä muutetaan kohtisuorat voimakomponentit kosinin avulla alkuperäisiksi voimiksi. Tällä kertaa niiden kulmat ovat yhtä suuret, koska painovoima osoittaa aina suoraan alas, ja sylinterien tukivoimat puolestaan aina ylös. Käytetään kulman symbolina  $\alpha$  kirjainta. Sylintereiltä vaadituksi voimaksi saadaan

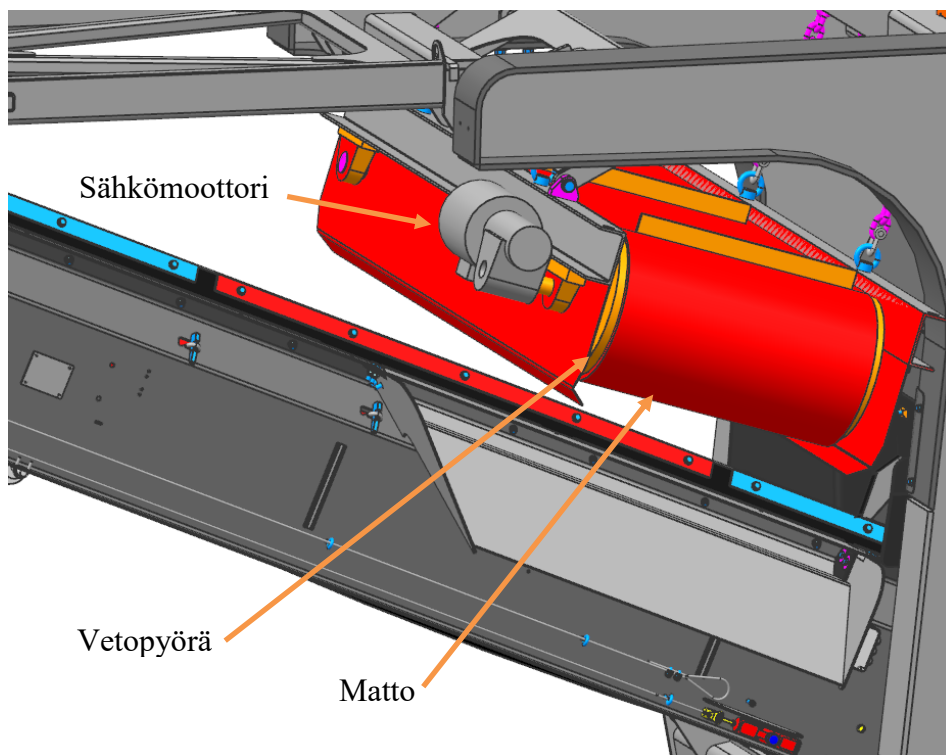
$$\begin{aligned}\Sigma M = 0 &\Leftrightarrow F_{\perp} * a - G_{\perp} * \frac{a}{2} = 0 \Leftrightarrow F_{\perp} * a = G_{\perp} * \frac{a}{2} \Leftrightarrow F_{\perp} = \frac{G_{\perp}}{2} \Leftrightarrow F * \cos\alpha \\ &= \frac{G * \cos\alpha}{2} \Leftrightarrow F = \frac{G}{2} = \frac{m * g}{2} = \frac{1090 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2} = 5346,45 \text{ N}\end{aligned}$$

joten yhdeltä sylinteriltä vaaditaan 2673,225 N eli noin 2,7 kN voimaa.

### 3.6 Magneettierotin

Magneettierotin on optio LT120E:ssä ja se sijaitsee pääkuljettimen päällä, noin puolessa välissä nousua. Sen tehtävä on erotella metalli murskaimen tuotteesta, jotta prosessin myöhemmässä vaiheessa olevat laitteet eivät rikkoudu metalliosien takia. Kuten aiemmin todettiin, leukamurskaimet eivät lähtökohtaisesti häiriinny esim. harjateräksestä, jota saattaa löytyä purkutyömaalla käsiteltävästä materiaalista. Tästä syystä erottelu voidaan tehdä prosessissa leukamurskaimen jälkeen. [15]

Magneettierotinta ajaa yksi 2,2 kW sähkömoottori. Se pyörittää erottimen sisällä olevaa akselia, johon on kiinnitetty vetopyörä, joka vastaavasti liikuttaa kumista mattoa. Itse magneetti sijaitsee erottimen sisällä. Se nostaa kuljettimella olevan magnetisoituvan materiaalin ylös ja liikkuva kuljetinmatto vie kappaleita kuljettimelta sivulle päin. Kun materiaali on liikkunut sivulle riittävän kauas magneetista, sen voima ei enää riitä pitämään kappaleita ylhäällä, vaan ne putoavat kuljettimen viereen maahan. Kuva 16 havainnollistaa erottimen osia. Koska magneettierotin toimii jo sähköllä, sen toimintaa ei ole tarpeen muuttaa työn puitteissa. [15]



**Kuva 16.** Magneettierotin sijaitsee kuljettimen päällä, se nostaa metalliosat kuljettimelta ja pudottaa ne laitteen viereen maahan [26].

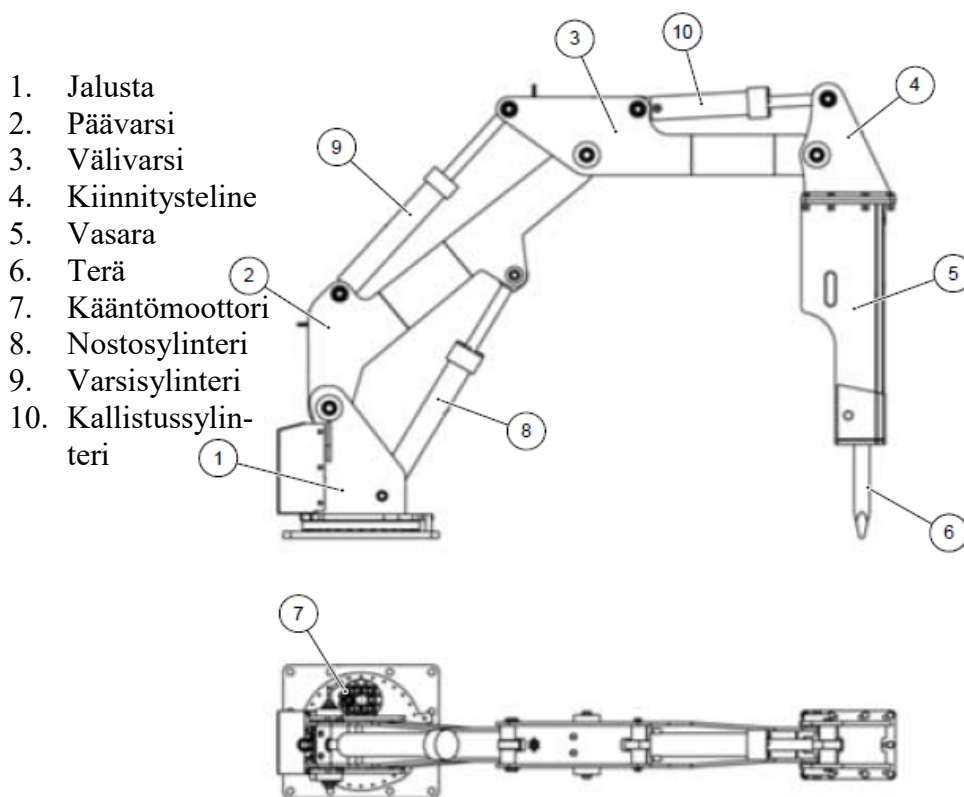
### 3.7 Sivukuljetin

LT120E:hen on mahdollista lisätä sivukuljetin, joka kuljettaa syöttimen alitemateriaalin pidemmälle pois päin laitteesta. Erotteluprosessi on käsitelty luvussa 3.3 syöttimen toiminnan yhteydessä. Alite voidaan ohjata suoraan prosessin myöhempään vaiheeseen tai väliaikaiseen kasaan laitteen viereen. Sivukuljettimen toimintaperiaate on sama kuin pääkuljettimella (luku 3.5) sillä poikkeuksella, että kuljetinta ajaa vain yksi 7,5 kW sähkömoottori. Epätasapainosta kuljettimen pituussuunnassa ei ole niin merkittävää haittaa tässä tapauksessa, koska 7 m pitkä kuljetin on selkeästi pääkuljetinta lyhyempi eikä sähkömoottorikaan ole kovin painava. Sivukuljettimenkaan toimintaa ei ole tarpeen muuttaa tämän työn puitteissa. [15]

### 3.8 Puomi ja vasara

Puomi ja sen päässä oleva hydraulinen vasara ovat myös yksi optio LT120E:ssä. Vasara on tarkoitettu syöttimeen tulevan suuremman materiaalin pienentämiseen sopivan kokoiseksi murskaimelle, ja joidenkin tukkeiden poistamiseen murskaimen sisällä. Puomi liikkuu kolmen eri hydraulisylinterin avulla, jotka kaikki liikuttavat varren eri osia. Lisäksi sen juuressa on hydraulimoottori kääntöä varten. Itse vasara on eräänlainen hydraulisylinterin ja paineakun sekoitus, iskuliike saadaan aikaan ajamalla terää hydraulineesteellä yhteen suuntaan, jolloin vastakkaisella puolella oleva typpikaasu puristuu kokoon.

Kun hydraulinesteen painetta lasketaan nopeasti, laajeneva kaasu ajaa terää vastakkaiseen suuntaan. Muuttamalla painetta vasaran sisällä tiuhaan, saadaan aikaan hakkaava liike. [15]



**Kuva 17.** Puomin eri osat selitettynä.

Vastaavaa kaupallista työkalua täysin sähköisenä ei etsinnöistä huolimatta löytynyt. Nopean ja hakkaavan liikkeen tuottaminen sähkökomponenteilla olisi luultavasti vaikeaa, sillä liikkeen luonne ja työkalun käyttöympäristö ovat todella raskaat mekaanisille välityksille. Tällaisen laitteen suunnittelu ei myöskään ole tarkoituksenmukaista tämän työn aihepiirissä. Näin ollen puomi ja vasara tulevat olemaan hydraulisia jatkossakin. Onneksi Metso tuottaa ja toimittaa kiinteisiin murskauslaitoksiin erillisiä puomi-vasara-laitepaketteja, joissa on oma hydraulijärjestelmänsä mukana. Näin ollen puomin voidaan ajatella olevan paikallinen hydraulijärjestelmänsä, jolle tuodaan teho sähköisenä.

### 3.9 Moottori

LT120E:ssä käytetään yleensä tehonlähteenä dieselmoottoria, jonka ainoa tehtävä on ajaa generaattoria ja kylkipumppua. Yleensä tähän laitteeseen asennetaan Caterpillarin C13, jolla on 12,5 litran iskutilavuus ja se tuottaa noin 309 kW tehoa. Moottorin ajonopeus riippuu kuormituksen suuruudesta ja sille asetetuista rajoituksista. Laitteessa käytettävä

moottorin päästöluokitus riippuu yleensä sen kohdemaasta, sillä asiakkaat usein valitsevat laitteisiin vain paikalliset päästörajoitukset ylittävän moottorin. Esim. Euroopassa on käytetty vuoden 2019 alun jälkeen Stage V -moottoreita. [15]

Sopivaa moottoria mietittäessä on syytä selvittää ensin, mikä prosessin vaihe vaatii eniten tehoa. Moottoria ei ole tarpeen mitoittaa kaikkien toimintojen yhteenlasketun tehon perusteella, koska niitä ei milloinkaan käytetä samaan aikaan. LT120E:ssä tämä on ehdotomasti murskausprosessi, koska jo pelkkä murskaimen sähkömoottori vaatii 160 kW tehoa. Se on samaa luokkaa, kuin muiden toimintojen yhteenlaskettu tehovaatimus. Murskaimen kanssa samaan aikaan käytetään kuljettimien ajoa, seulan pyöritystä, magneettierotinta ja jäähdytintä, joista ainoastaan seulan ja jäähdyttimen toimintaa ollaan muuttamassa. Kumpikaan niistä ei vie suhteessa paljoa tehoa, joten saman kokoluokan moottoria tullaan jatkossakin luultavasti käyttämään.

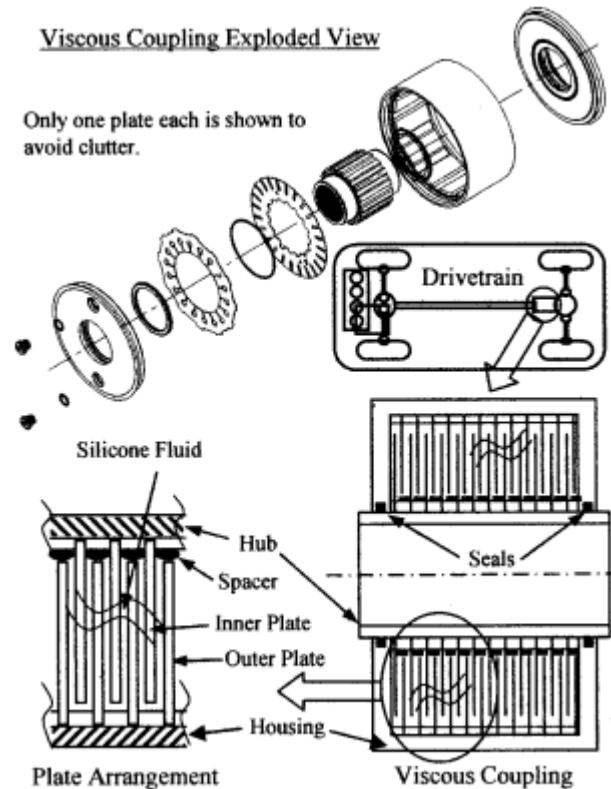
### 3.10 Jäähdytin

Jäähdyttimen tehtävä on jäähdyttää moottoritilaa, jäähdytysnestettä ja hydraulioöljyä. Itse moottori sijaitsee koteloinnin sisällä mm. generaattorin, hydraulisäiliön ja ilmanpuhdistimen kanssa, ja tätä kokonaisuutta kutsutaan moottorimoduuliksi. Kotelo on hieman putkimainen, jäähdytin sijaitsee sen toisessa päässä ja toinen pää on avonainen, jolloin propelli puhalttaa koko moduulin lävitse. Tällöin ilma vaihtuu koteloinnin sisällä jatkuvasti ja kaikki sen sisällä olevat komponentit jäähtyvät. [15]

Jäähdyttimen propellia ajetaan nykyisessä mallissa pienellä hydraulimoottorilla, joka saa tehonsa joko dieselmoottoriin kiinnitetystä kylkipumpusta tai isolta hydraulipumpulta käytettäessä Plug-in -toimintoa. Sen pyörimisnopeutta voidaan säätää jäähdytystarpeen mukaan ja käyttö onnistuu myös silloin, kun moottori on pois päältä. Toimintoa ei kuitenkaan ole välttämätöntä toteuttaa juuri hydraulikalla, sen tilalle voitaisiin laittaa esimerkiksi sähköinen tai pneumaattinen järjestelmä. Paineilmakäytön huonona puolena on se, että tällöin laitteeseen täytyisi asentaa kompressorin, jota ei tarvita mihinkään muuhun kuin propellin pyörittämiseen. Sähkökäyttö taas vaikuttaa loogiselta vaihtoehdolta, koska laitteessa on jo saatavilla sähköistä tehoa, eikä moottorin tarvitse olla kovin suuri ja kallis käydäkseen tarkoitukseensa. Sähkökäyttö kuitenkin vaatisi myös taajuusmuuttajan, jotta pyörimisnopeus olisi säädettävissä. Jäähdyttimen ajo voidaan toteuttaa myös viskokytkimien avulla ottamalla teho suoraan dieselmoottorilta. [15]

Viskokytkin toimii välityksenä eräänlaisena joustavana akselina. Sen toiseen päähän kiinnitetään pyörivä akseli, jonka liike välittyy kytkimen lävitse toiselle puolelle erilaisena riippuen lämpötilasta ja pyörimisnopeudesta. Sen sisällä on tyypillisesti korkean viskositeetin omaavaa nestettä ja ohuita rei'itettyjä metallilevyjä. Levyt on aseteltu tasaisin välein niin, että joka toinen levy on kiinni keskiössä ja joka toinen ulkokuoressa. Keskiö ja ulkokuori on laakeroitu, joten metallilevyt eivät ole kosketuksissa toisiinsa muuten

kuin nesteen välityksellä. Koska sen viskositeetti on suuri ja välit kapeita, keskiön pyörittäminen johtaa myös ulkokuoren pyörimiseen leikkausvoiman ansiosta. Kun levyt pyörivät samalla nopeudella, neste säilyy viileänä ja juoksevana, mutta kun jompikumpi levypakka muuttaa nopeuttaan, neste alkaa lämmetä ja jähmettyä. Tällöin levyt pyrkivät uudestaan samaan nopeuteen. Levyjen määrä, niiden rei'itys ja käytetty neste vaikuttavat kytkimen ominaisuuksiin ja välitykseen. Teknologia on yleisesti käytössä mm. henkilöautoissa nelivedossa ja tasauspyörästössä. Kuva 18 havainnollistaa viskokytken rakennetta. [28]



**Kuva 18.** Viskokytken (eng. *Viscous coupling*) räjäytyskuva, jossa näkyy vain yhden levyt selkeyden vuoksi. Keskellä näytetään, missä kytkintä voitaisiin esimerkiksi käyttää nelivedossa. Alhaalla esitetty levyjen kokoonpano. [28]

## 4. LAITE-EHDOTUKSET

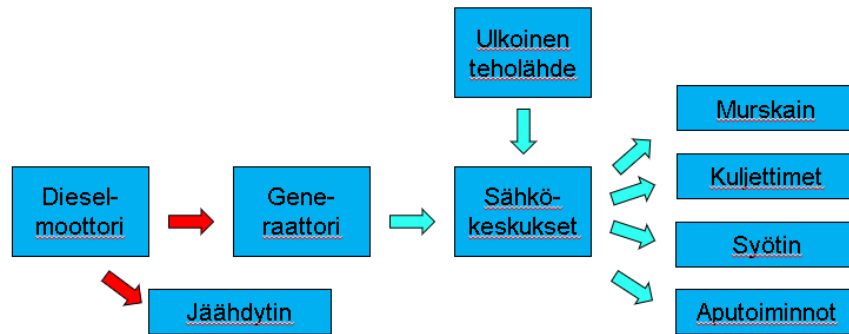
Tässä kappaleessa käsitellään kahta eri toteutusehdotusta sähköisestä LT120E:stä. Molempiin on mitoitettu komponentit edellisen kappaleen laskelmien perusteella. Mitoitus ei ole täydellisen tarkasti toteutettu, eikä kaikkia mahdollisia lisäkomponentteja välttämättä huomioitu, koska se ei ole työn tarkoituksen mukaista. Näillä komponenttiedoilla voidaan arvioida mm. laitteen tuotantokustannuksia ja takaisinmaksuaikaa seuraavassa luvussa. Komponenttilistauksiin ei ole otettu mukaan laitteessa jo olevia sähkökomponentteja, koska niitä ei tulla muuttamaan. Listoista puuttuu myös puomi-vasarayhdistelmä, koska sitä ei tarvitse hankkia erikseen. Metso tuottaa erillisiä vasaroita kiinteisiin laitoksiin, kuten edellisessä luvussa todettiin, joten järjestelmän suunnittelu ei tule olemaan ongelma toteutuksesta riippumatta ja osien hankintakustannuksetkin ovat tällöin samat.

### 4.1 Täysin sähköinen toteutus

Ensimmäinen toteutusvaihtoehto on täysin sähköinen laite. Siinä kaikki toimilaitteet toimivat joko sähköllä, tai jäähdyttimen tapauksessa mekaanisella viskokytkimellä. Toteutuksessa on käytetty Bosch Rexrothin sähköisiä sylintereitä, koska yritys auttoi komponenttien vaatimuksien ja mitoituksien laatimisessa. Toimilaitteet ja niiden tarvitsemat lisälaitteet on koottu Taulukko 2 ja ehdotuksen energiavuokaavio on purettu Kuva 19.

**Taulukko 2.** Sähköisen toteutuksen toimilaittevalinnat.

Toiminto	Komponentti	Lukumäärä (kpl)
Syöttimen ajo	Sähköinen vibra, 50 Hz, 5,6 kW	2
	Taajuusmuuttaja, 5,5 kW	2
Tela-ajo	Oikosulkumoottori, 50 Hz, 55 kW	2
	Taajuusmuuttaja, 55 kW	2
Jäähdyttimen pyöritys	Viskokytkin, teho dieselmoottorilta	1
Syöttimen laitojen nosto	Sähkösylinteri, EMC-HD-105	3
Syöttimen laitojen lukitus	Sähkösylinteri, EMC-032	4
Asetuksen säädön kiilat	Sähkösylinteri, EMC-HD-180	2
Asetuksen säädön veto	Sähkösylinteri, EMC-HD-105	1
Pääkuljettimen nosto	Sähkösylinteri, EMC-050	2
Pääkuljettimen taitto	Sähkösylinteri, EMC-HD-150	2



**Kuva 19.** Täysin sähköisen laite-ehdotuksen energiavuokaavio.

Syöttimelle valittiin samat täryttimet, kuin edellisessä kappaleessa mainitussa NW120-murskainvaunulaitoksessa. Niiden etuna on tuttu tekniikka ja valmiiksi olemassa olevat kiinnitysosat. Täryttimet tarvitsevat taajuusmuuttajat, jotta niiden pyörimisnopeutta voidaan säätää. Syöttimen jarruttaminen onnistuu myös taajuusmuuttajan avulla, esimerkiksi ajamalla niitä epätahdissa syöttimen kanssa tai vaihtamalla pyörimissuuntaa kokonaan. Yksi taajuusmuuttaja riittäisi periaatteessa, sillä täryttimiä ei tarvitse ajaa eri nopeuksilla, mutta käynnistyksessä voi olla ongelmia raskaan toiminnon takia.

Tela-ajoon valittiin Metson sisäisestä järjestelmästä oikean kokoiset kolmen napaparin oikosulkumoottorit malliksi. Ne eivät ole suoraan ajoa varten tehtyjä, mutta antavat käsitystä hinnasta. Moottorit tarvitsevat myös omat taajuusmuuttajat, jotta laitetta voidaan kääntää ja sen nopeutta muuttaa. Kolmen napaparin moottorit valittiin, koska laitteessa on 50 Hz järjestelmä vakiona, jolloin päästään lähelle haluttua 900 rpm pyörimisnopeutta. Pyörimisnopeus laskettiin kaavalla

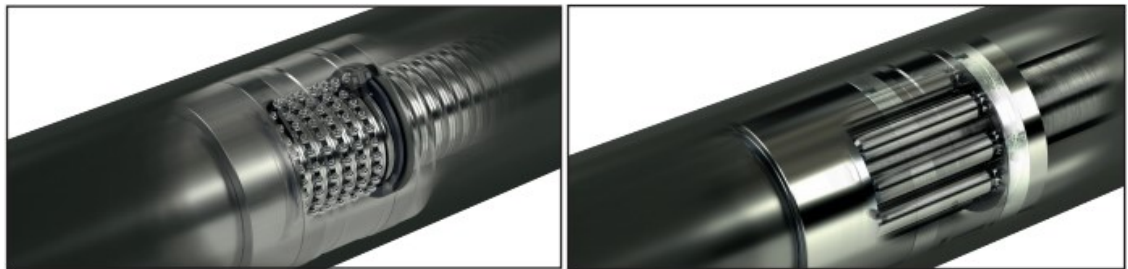
$$n = \frac{60 * f}{p_p} \quad (10)$$

jossa  $n$  on pyörimisnopeus,  $f$  verkon taajuus ja  $p_p$  napapariluku. Taajuutta kerrotaan 60:llä, jotta pyörimisnopeus saataisiin suoraa minuutteina eikä sekunteina. Sijoittamalla yllä mainitut luvut kaavaan, saadaan tulokseksi  $n = 1000$  rpm. Epätahtimoottoreissa syntyy jättämää aina jonkin verran, joten todellinen pyörimisnopeus on tätä pienempi. Nopeus voidaan säätää tarkemmin haluttuun arvoon taajuusmuuttajien avulla.

Jäähdyttimen propellia pyörittämään valittiin viskokytkin. Kytkimen etuna esimerkiksi paineilmakäyttöön tai sähkökäyttöön on komponenttien pienempi määrä ja sitä myöten myös halvempi hinta. Paineilmamoottori vaatisi erillisen kompressorin, säätöventtiilin ja letkutuksen toimiakseen. Sähkökäytössä taas teholähde on jo olemassa, mutta moottorin lisäksi tarvittaisiin silti taajuusmuuttaja, jotta jäähdyttimen nopeutta voidaan muuttaa. Viskokytkimen välityksellä jäähdyttimen nopeus muuttuu moottorin nopeuden muuttuessa. Myös lämpötilan nousu moottoritilassa saa jäähdyttimen pyörimään nopeammin,

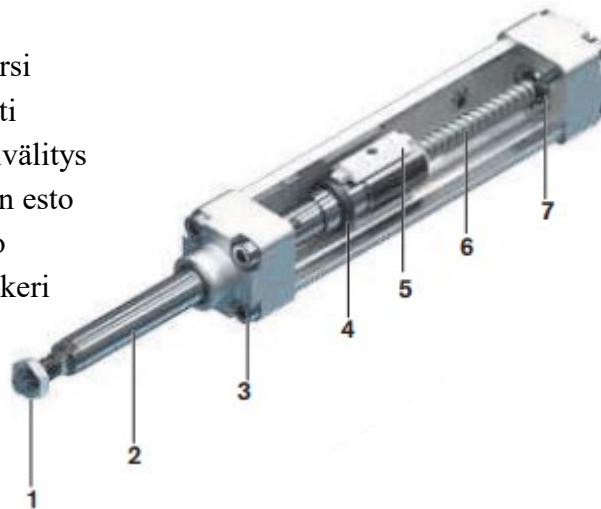
joten säätö hoituu itsestään. Lisäksi moottorin ja jäähdyttimen välinen tila ei ole kovin suuri, ja viskokytkin vie vähiten tilaa.

Sylinteritoimintoihin valittiin listassa olevat sähkösylinterit laskujen perusteella. Kuten luvun alussa todettiin, Bosch Rexroth auttoi komponenttien mitoituksessa, joten työhön otettiin heidän komponenttejaan, ja mm. oikeiden sylinterien valinnassa hyödynnettiin LinSelect nimistä mitoitus työkalua. Sähkösylinterit eroavat hieman valmistajien kesken, mutta perusperiaatteeltaan ne toimivat samalla tavalla. Sähkömoottori, tässä tapauksessa servomoottori, ajaa sylinterin sisällä olevaa kierretankoa. Sen ympärille on kiinnitetty joko kuularuuvi tai planeettaruuvi välitykseksi. Molemmat vaihtoehdot on esitelty Kuva 20. Välityksen pyöriminen kierretangon mukana on estetty, jolloin se liikkuu edes takaisin tangon kiertyessä. Sylinterin varsi on kiinnitetty välitykseen, jolloin kierretangon pyöriminen saadaan muutettua varren lineaariliikkeeksi. Kuva 21 esittää sylinterin eri osia. [3, 4]



**Kuva 20.** Sähkösylintereissä pyörimisliike muutetaan välityksellä lineaariseksi. Vasemmalla esiteltynä kuularuuvi, oikealla planeettaruuvi [3].

1. Mutteri
2. Männän varsi
3. Kuusiopultti
4. Kuularuuvivälitys
5. Kiertymisen esto
6. Ruuvitanko
7. Aksiaalilaakeri



**Kuva 21.** Bosch Rexrothin EMC:n (electromechanical cylinder) osat ilman sähkömoottoria. [5]

Bosch Rexroth tarjoaa sylintereistään kahta eri mallistoa, EMC ja EMC-HD -tyyppejä. Jälkimmäisessä HD tulee sanoista Heavy Duty, eli se on kestävämpi ja tuottaa suurempia



voimia [3]. Sen myös tunnistaa mustasta rungosta, kun tavallinen EMC on metallin väri-  
nen. Käytettiin kuitenkin kumpaa sylinterityyppiä tahansa, LT120E:n työympäristössä ne  
vaatisivat kotelointia, ettei hienojakoinen kivipöly pääse välityksiin ja riko niitä. Niinpä  
tässä laite-ehdotuksessa käytetään sekä tavallista että HD-tyyppiä. Tämän työn aihepii-  
rissä koteloinnit on jätetty pois, koska niiden hinnoittelu vaatisi paljon suunnittelutyötä.  
Jokaista toimintoa ei kuitenkaan voi suoraan laittaa kotelon sisään. Lisäksi tulevaisuu-  
dessa sylinterit luultavasti voidaan suunnitella kestäämään pölyä ja likaa paremmin, var-  
sinkin jos niitä halutaan saada käyttöön maastossa erilaisissa mobilesovelluksissa.

Sylinterit tarvitsevat toimiakseen itse sylinterin (Kuva 21), sähkömoottorin ja ohjauskor-  
tin. Nämä kaikki kuuluvat samaan pakettiin, jonka saa toimittajalta. Sylintereissä on si-  
sään rakennettuna päätyasennon tunnistus, joka vaimentaa liikettä ja estää välitystä aja-  
masta päätyjä päin. Lisäksi niistä saa halutessaan asematakaisinkytkentädataa, mutta se  
on tarpeeton LT120E:n sylinterisovelluksissa. Sylinterien kanssa tulevat servomoottorit  
ovat myös liian tarkkoja, sillä ne on suunniteltu mahdollistamaan varren tarkka aseointi  
nopeasti. Kaikissa sylinteritoiminnoissa, asetuksen säätöä lukuun ottamatta, liike tapah-  
tuu aina päädyistä päätyyn eikä hienosäädölle ole tarvetta. Pitojarru puolestaan on hyö-  
dyllinen ominaisuus, joka valittiin kaikkiin sylintereihin. Ilman sitä varsi saattaa alkaa  
valumaan painon alla. Sylinterien kokovalikoima on myös hieman suppea, sillä voimak-  
kaammat vaihtoehdot ovat myös pidempiä. Monessa tapauksessa LT120E:ssä tämä ei  
haittaa, mutta esimerkiksi asetuksen säädössä vaadittu voima on suuri ja iskun pituus ly-  
hyt. Tällöin tila saattaa muodostua ongelmaksi. Tämä johtuu luultavasti tekniikan uu-  
tuudesta, sillä kysyntää laajalle valikoimalle ei ole ehtinyt muodostua. [3, 4]

Laitteesta muuttuu vain kaksi murskausprosessin aikaista toimintoa, syöttimen pyöritys  
ja jäähdyttimen ajo, joten tehovaatimus laskee hiukan. Jäähdyttimen teho pienenee var-  
masti, koska hydraulioöljyn jäähdytystä ei enää tarvita ja syöttimestäkin tulee energiate-  
hokkaampi uusien moottorien myötä. Vanha hydraulimoottori vaati n. 14 kW, kun taas  
kaksi sähkötärytintä käyttävät yhteensä vain 11,2 kW. Näin ollen prosessinaikainen teho-  
tarve on ehdotetussa laitteessa muutaman kilowatin pienempi. LT120E:ssä kuormitus on  
ollut luokkaa 37 % normaalissa käytössä [25], eli vain noin 114 kW. Tämä johtuu siitä,  
että moottori on optimoitu pienemmälle kierrosnopeusalueelle kuin maksimiteho vaatisi.  
Moottoria ei jatkuvassa käytössä ole järkevää ajaa suurella kuormalla ja täydellä teholla,  
koska se kuluisi hyvin nopeasti loppuun. Nykyisessä versiossa kaikkien murskausproses-  
sitoimintojen yhteenlaskettu teho on noin 206 kW, joten moottoriin on mitoitettu varaa

$$1 - \left( \frac{206 \text{ kW}}{309 \text{ kW}} \right) \sim 0,33$$

eli noin kolmanneksen kokonaistehosta. Laitteen teholähteeksi kannattaa siis valita Ca-  
terpillarin uusi C9.3B Stage V moottori, jossa on tehoa 310 kW. Tällöin varaa on aavis-  
tuksen enemmän, vaikka moottori on vanhaa pienempi. Se on edellistä C9.3 kokoluokan  
moottoria tehokkaampi, ja sillä on yhtä suuri maksimiteho kuin vanhalla C13-moottorilla.

## 4.2 Sähköhydraulinen toteutus

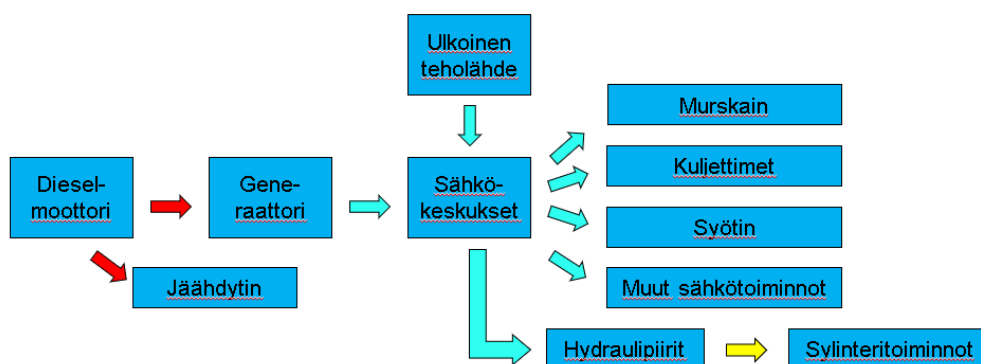
Toinen toteutusehdotus on sähköhydraulinen laite. Siinä osa toiminnoista toteutetaan edelleen hydraulikomponenteilla, kuten vanhassakin laitteessa, mutta järjestelmän rakenne on erilainen. Tällä hetkellä LT120E:ssä on sähköjärjestelmään kytkettynä keskitetty hydraulijärjestelmä. Siinä yksi sähkömoottori pyörittää yhtä hydraulipumppua, joka tuottaa tehon kaikille hydraulitoiminnoille. Teho kuljetetaan letkuja pitkin toimilaitteille ja säätö tapahtuu myös hydraulisesti. Hydrauliikan määrää saadaan vähennettyä luomalla hajautettu järjestelmä. Siinä järjestelmä on jaettu pieniin yksittäisiin kokonaisuuksiin, joihin teho tuottaa oma pumppu, ja pumppua pyörittää oma sähkömoottori. Niillä on myös omat hydraulisäiliönsä ja suodattimensa, joten ne toimivat täysin erillään toisistaan.

Ehdotetussa järjestelmässä sylinteritoiminnot on jaettu kolmeen hydraulipiiriin. Muut toiminnot toteutetaan samoilla sähkökomponenteilla kuin täysin sähköisessä toteutuksessa. Periaatteessa hajautettu järjestelmä voitaisiin toteuttaa vaikka jokaisen toimilaitteen omalla piirillä, mutta kolmeen järjestelmään päädyttiin toimilaitteiden sijainnin ja teho-vaatimusten perusteella. Komponenttien määrää haluttiin myös rajata hieman, sillä jokainen piiri vaatii aina mm. pumpun ja sähkömoottorin. Energiavuokaavio sähköhydraulisesta laitteesta on Kuva 22 ja listaus pääkomponenteista löytyy Taulukko 3. Se ei sisällä aivan kaikkia komponentteja, koska tässä kohtaa riittää, että tiedetään pääosat. Täydellinen luettelo löytyy liitteestä B, mitoituslaskelmien jälkeen. Sitä hyödynnetään vasta ensi luvussa kustannuksia arvioitaessa.

**Taulukko 3.** Sähköhydraulisen toteutuksen pääkomponentit. Sarakkeessa ”Piiri” eritellään mitkä komponentit kuuluvat mihinkin kokonaisuuteen. Osassa ”Muu” ei enää ole hydraulikomponentteja, ne vain eroteltiin omaksi ryhmäkseen.

Piiri	Komponentti	Tietoja	Määrä (kpl)
1	Sähkömoottori	Oikosulku, 11 kW	1
	Pumppu	Bosch Rexroth AZPF-11-022	1
	Tankki	Paisuntasäiliö, 20 l	1
	Sylinteri	60/40x400	3
	Sylinteri	40/20x230	4
	Venttiililohko		1
2	Sähkömoottori	Oikosulku, 11 kW	1
	Pumppu	Bosch Rexroth AZPF-11-022	1
	Tankki	Paisuntasäiliö, 20 l	1
	Sylinteri	100/56x250	2
	Sylinteri	80/50x350	1
	Sylinteri	60/32x250	2
	Venttiililohko		2

3	Sähkömoottori	Oikosulku, 3 kW	1
	Pumppu	Bosch Rexroth AZPF-11-005	1
	Tankki	Paisuntasäiliö, 20 l	1
	Sylinteri	80/56x830	2
	Venttiililohko		1
Muu	Sähkömoottori	Oikosulku, 55 kW	2
	Taajuusmuuttaja	Ajomootoreille	2
	Viskokytkin	Jäähdyttimelle	1
	Vibra	5,6 kW (50 Hz)	2



**Kuva 22.** Sähköhydraulisen laite-ehdotuksen energiavuokaavio.

Syöttimen laitojen piiri, joka on Taulukko 3 numeroitu piiriksi 1, sisältää syöttimen laitojen nostosylinterit ja lukituskiilojen käyttösylinterit. Toiminnot sijaitsevat syöttimen ympärillä, ja kuten aiemmin todettiin, syöttimen alla on ylimääräistä tilaa käytettävissä. Näin ollen tarvittavat komponentit voi sijoittaa esimerkiksi sinne. Piiri 2 taas sisältää asetuksen säädön ja kuljettimen noston sylinterit. Ne sijaitsevat murskaimen vieressä ja alla, joten piirille löytynee tilaa murskaimen lähetyviltä. Sattumalta piirin 2 tilavuusvirran tarve on sama kuin piirin 1, joten se voidaan toteuttaa samalla pumpulla ja sähkömoottorilla. Piiri 3 puolestaan on ainoastaan kuljettimen taittosylintereitä varten, joten se on selkeästi pienempi ja mahtuu lähelle kuljetinta. Tämän jaottelun etuna on se, että piirejä voidaan jättää pois, mikäli jotakin toimintoa ei laitteessa tarvita. Joissakin laitteissa syöttimen laitoja ei tarvitse kyetä liikuttamaan ja pidennetty pääkuljetin on melko harvinainen optio, mutta piirin 2 toiminnot tulevat joka koneeseen.

Kaikkien tämän toteutuksen komponenttien mitoituslaskenta löytyy myös liitteestä B, mutta tässä luvussa kerrotaan lyhyesti, miten laskenta tapahtui. Aluksi hydraulitoiminnot jaettiin piireihin niiden sijainnin mukaan. Normaalissa mitoituksessa jatkettaisiin toimilaitteista, mutta koska kaikki hydraulisylinterit ja venttiililohkot pysyvät samoina, tämä vaihe voitiin sivuuttaa. Piireissä vallitsevaksi painetasoksi valittiin 250 bar. Sylinterien liikenopeuden raja-arvojen perusteella määritettiin tilavuusvirrat, joista saatiin pumpuilta

vaaditut kierrostilavuudet. Pumpuiksi valittiin hammaspyöräpumppuja, koska ne ovat robusteja ja halpoja varsinkin pienillä kierrostilavuusalueilla. Seuraavaksi laskettiin tehotarpeen perusteella sopivat sähkömoottorit ajamaan pumppuja. Moottoreiksi valittiin oikeuskumoottorit niiden suuren käynnistysmomentin, halvan hinnan ja luotettavuuden takia. Pumppujen kokoa saatiin laskettua entisestään valitsemalla moottoreita, joissa on kaksi napaparia kolmen sijaan, koska pyörimisnopeutta voitiin tällöin kasvattaa. Tämä käy ilmi kaavasta 10, jossa  $p_p$ :n arvon laskiessa nopeus nousee. Niinpä pumppujen pyörimisnopeus on kaavan perusteella

$$n = \frac{60 * f}{p_p} = \frac{60 * 50 \text{ Hz}}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

jossa  $n$  on pyörimisnopeus,  $f$  taajuus ja  $p_p$  napaparien lukumäärä. Jos napapareja olisi ollut kolme, pyörimisnopeus olisi jäänyt 1000 kierrokseen minuutissa, ja koska tuotettu tilavuusvirta kasvaa pyörimisnopeuden kasvaessa, kierrostilavuus voi olla pienempi ja haluttuun virtaukseen päästään silti. Sitten laskettiin järjestelmien vaatimat öljymäärät. Karkeasti ne voidaan mitoittaa laskemalla sylinterien yhteistilavuus ja tuplaamalla vastaus. Hydraulitankin tilavuus taas on mobilejärjestelmissä yleisesti 1,5-2 kertaa öljyn tilavuus. Kuten listauksesta näkyy, tankeiksi valittiin paisuntasäiliöitä. Tämä siksi, että piireissä on epäsymmetrisiä sylintereitä, joten tankeissa olevan öljyn tilavuus riippuu sylinterien asennosta. Tämä johtaisi painevaihteluihin tavallisissa hydraulitankeissa, joten niihin yleensä lisätään huohotin. Koska komponenttien määrä ja koko haluttiin pitää pienenä, päädyttiin kuitenkin käyttämään paisuntasäiliötä, joka ei huohotinta tarvitse. Tankin jälkeen laskettiin vielä sopivat suodattimet käytetyille virtaus- ja painetasoille. Venttiilejä ei tarvinnut erikseen mitoittaa, sillä piireissä voidaan käyttää samoja kuin nykyisessä LT120E:ssä. Jäähdyttimiä piirit eivät tarvitse, sillä sylinteritoimintoja käytetään niin harvoin ja vähän aikaa kerralla, ettei ylimääräisestä lämmöstä ehdi muodostua ongelmaa. Lämmittimiä järjestelmissä puolestaan saatetaan tarvita, sillä laitteita myydään pääasiassa Pohjoismaihin. Niiden ei onneksi tarvitse olla kovin suuria ja tehokkaita, koska piireissä on niin vähän öljyä. Letkuja on vaikea mitoittaa suunnittelematta, miten koko järjestelmä asennettaisiin laitteeseen. Niitä arvioitiinkin valitsemalla EN857-standardin 2SC letkua, jossa on kaksi teräsvaijerista punottua vahvikekerrosta. Pituuksiksi arvioitiin sylinterilinjoiille 3 m, imu- ja paluulinjoille 1 m ja yhdelle paineakulle johtavalle letkulle 0,5 m. Painelinjoja ei mitoitettu, koska venttiilit on mahdollista kiinnittää suoraan pumppuihin kiinni. Laitteen dieselmoottori on Caterpillarin C9.3 Stage V, ja se valittiin samoista syistä kuin täyssähköisessä versiossakin.

## 5. LAITEVERTAILU

Tässä kappaleessa vertaillaan eri versioita LT120E:stä toisiinsa; ensin uusia ehdotuksia nykyiseen laitteeseen, sitten keskenään. Kilpailijavertailun toteuttamista harkittiin myös työhön liittyen. Siitä päätettiin kuitenkin luopua, koska kilpailijoiden ratkaisusta on vaikea saada luotettavaa yksityiskohtaista tietoa.

### 5.1 Vertailu nykyiseen LT120E:hen

Oheinen Taulukko 4 vertailee nykyistä toteutusta edellisessä luvussa ehdotettuihin. Siinä jokainen kategoria (rivi) on pisteytetty yhdestä kolmeen plusmerkeillä ja mitä useampi niitä on, sen parempi. Arviointi on toteutettu itse käyttäen työssä esiin tulleita tietoja, sekä koulutuksen tarjoamaa pohjatietoa. Joissakin arvioinneissa hyödynnettiin myös Metsolla kollegojen kanssa käytyjä keskusteluja. Kategorioita on avattu ja perusteltu taulukon jälkeen.

**Taulukko 4.** LT120E:n nykyinen keskitetty hydraulijärjestelmä vertailussa kahteen uuteen toteutukseen. Jokainen kategoria on pisteytetty järjestelmiin plusmerkeillä siten, että yksi on huonoin ja kolme paras. Tasapisteet tarkoittavat, että järjestelmien välillä ei ole eroa juurikaan.

	<b>Keskitetty hydraulijärjestelmä</b>	<b>Hajautettu hydraulijärjestelmä</b>	<b>Täysin sähköinen järjestelmä</b>
<i>Ympäristöriski</i>	+	++	+++
<i>Järjestelmän saastumisen riski</i>	+	++	+++
<i>Lämpötilakriittisyys</i>	+	++	+++
<i>Tehon tarve</i>	+	+++	+++
<i>Hyötysuhde</i>	+	++	+++
<i>Energiamuunnosten määrä</i>	+	+	+++
<i>Reititys ja asennus</i>	+	++	+++
<i>Vian etsinnän helppous</i>	+	++	+++
<i>Huollon monialaisuus</i>	+	+	+++
<i>Huollon kesto</i>	+	++	+++

<i>Teknologia tuttua</i>	+++	++	+
<i>Komponenttien saata- vuus</i>	+++	+++	+
<i>Hankintakustannukset</i>	++	+++	+

Hydrauliöljyn merkittävä väheneminen laitteessa tuo helpotusta mm. ympäristölupien saamiseen ja maaston suojaamiseen, sillä mahdollisen vuodon aiheuttama ympäristöhaitta on huomattavasti pienempi. Myös vuodon todennäköisyys pienenee, kun letkuja on vähemmän. Kun vanhaan LT120E:hen tankattiin 235 litraa hydrauliöljyä [15], sähköhydraulinen versio vaatii sitä ainoastaan 30 litraa ja täysin sähköinen ei lainkaan. Näin ollen ympäristöriski on pienempi. Vähemmän hydraulikomponentteja tarkoittaa myös pienempää riskiä koko järjestelmän saastumiseen. Hydraulikassa väärään paikkaan joutunut kivenmurunen tai metallin palanen voi rikkoa komponentteja, jotka rikkoutuessaan saattavat irrottaa lisää palasia. Keskitetyssä hydraulijärjestelmässä likaantuminen uhkaa koko järjestelmää, kun taas hajautetussa järjestelmässä ainoastaan yhtä piiriä kerralla. Täyssähköisessä järjestelmässä tätä riskiä luonnollisesti ei ole. Hydrauliöljy on myös riippuvainen lämpötilasta, minkä takia järjestelmät vaativat usein jäähdytystä ja lämmitystä. Esimerkiksi kylmissä olosuhteissa voidaan joutua odottamaan pitkiäkin aikoja, että neste on lämmintä ja toimii normaalisti. Koska komponentit tehdään usein paksusta metallista, jotta ne kestävätkä painetta paremmin, ne myös lämpiävät hitaasti. Lämmittäminen vaatii myös moottorin käynnissä pitämistä, ellei Plug-in -toiminto ole käytössä, mikä aiheuttaa turhia päästöjä ympäristöön. Koska keskitetyssä hydraulijärjestelmässä hydraulinestettä on niin paljon, sen lämpötilakriittisyys on myös suurin. Hajautettu järjestelmä puolestaan lämpiää melko nopeasti pienten piirien ansiosta. Sähköjärjestelmäkin on luonnollisesti lämpötilakriittinen johtuen komponenteissa käytettyjen materiaalien käyttäytymisestä. Bosch Rexroth ilmoittaa sylintereilleen käyttölämpötilaksi ainoastaan 0 – 40 °C normaalisti, mutta alarajaa voidaan laskea käyttämällä mm. korkeamman viskositeetti-indeksin omaavaa voitelurasvaa. Tällöin käyttöväli on jopa -30 – 50 °C, mutta myös muut komponentit vaikuttavat sallittuun käyttöympäristön lämpötilaan [3, s. 68]. Esimerkiksi voima-anturi rajoittaa alarajan -20 °C [3, s. 62]. Näin ollen sähköjärjestelmäkin on lämpötilakriittinen, mutta ei yhtä merkittävästi kuin hydraulijärjestelmät.

Molemmat toteutusehdotukset käyttävät ns. Power-by-wire -toimintaperiaatetta, josta kerrottiin luvussa 2. 4. Kuten siellä todettiin, tällaisella järjestelmällä on parempi hyötysuhde, kuin keskitetyllä hydraulijärjestelmällä. Pitkissä letkuissa kulkeva hydraulineste menettää energiaansa pikkuhiljaa, ja kun siirto tapahtuu pääosin sähköisenä, häviöt jäävät pienemmiksi. Hydraulisilla toimilaitteilla on myös keskimäärin huonompi hyötysuhde kuin sähköisillä. Lisäksi jokainen energiamuunnos kuluttaa energiaa, joten kun dieselmoottorin tuottama pyörimisliike on muunnettu kertaalleen sähköksi, sen muuttaminen edelleen hydrauliseksi tehoksi tuottaa häviöitä. Samassa luvussa todettiin myös, että joh-

tojen reitittäminen ja asentaminen on helpompaa kuin letkujen ja putkien. Koska sähköhydraulisessa järjestelmässä on vähemmän letkuja ja enemmän johtoja, se on parempi kuin keskitetty järjestelmä.

Vian etsiminen ja korjaaminen helpottuu myös hajautetun hydraulijärjestelmän tai sähköjärjestelmän myötä. Vikojen paikannus on hieman hankalampaa sähköhydraulisessa järjestelmässä, sillä sen korjaajan täytyy tuntea sekä sähkö- että hydraulikkaongelmat. Tästä päästäänkin taulukossa seuraavaan kriteeriin, eli huollon monialaisuuteen, jolla tarkoitetaan sitä, monenko eri alan osaaja huoltajan täytyy olla. Molemmat hydrauliset toteutukset vaativat, että huoltohenkilö tuntee sekä sähkö- että hydraulikan alan ongelmat. Erona keskitetyssä ja hajautetussa järjestelmässä puolestaan on se, että hajautetussa versiossa jokainen ongelma vaatii sähköalan koulutusta ja se on siten hankalampi korjata, kun taas keskitetyssä versiossa voi riittää pelkkä hydraulikan tietämys. Hydraulikkavian korjaus ei vaadi tietyn alan koulutusta, lukuun ottamatta työturvallisuuskurssia, joka täytyy olla kaikilla korjaajilla joka tapauksessa. Huoltaminen kestää kuitenkin kauimmin keskitetyssä hydraulijärjestelmässä juuri vian paikannuksen hitauden ja letkujen tulppaamisen takia. Hajautetussa järjestelmässä piirit ovat pieniä, joten vika on helpompaa rajata heti selvityksen alussa. Täyssähköisessä järjestelmässä taas esimerkiksi sähkösylinterin vikaantuessa koko komponentti voidaan vaihtaa uuteen selvityksen ajaksi, jolloin laite voidaan ottaa takaisin käyttöön melko nopeasti.

Toisaalta juuri hajautettuja hydraulijärjestelmiä käytetään pääsääntöisesti kaikissa Metso Mineralsin mobiilimurskauslaitoksissa. Näin ollen niiden suunnittelu ja muuttaminen sujuu lähes rutiinilla, kun taas kummatkin ehdotetut toteutukset vaativat uuteen teknologiaan tutustumista. Tämä ei saa olla kehityksen esteenä, mutta se on hyvä huomioida tulevaisuutta suunniteltaessa. Perinteisiä hydraul- ja sähkökomponentteja on myös saatavilla huomattavasti paremmin kuin sähköisiä sylinterejä. Tämä voi osoittautua ongelmaksi joskus tulevaisuudessa, mutta toisaalta sähkösylinterit ovat kehittymässä kovaa vauhtia, joten niitä tulee markkinoille vähitellen useammalta toimijalta.

Hankintakustannukset puolestaan kallistuvat vertailussa merkittävästi sähkökomponentteja vastaan. Jos laitteen kaikki hydraulikomponentit korvattaisiin sähköisillä, korvaavan järjestelmän hinta olisi yli kuusinkertainen hydraulikomponenttien hintaan verrattuna. Vastaavasti hajautettu hydraulijärjestelmä maksaa arviolta alle 90% keskitetystä. Toisin sanoen hajautettuun järjestelmään vaihtaminen toisi kustannussäästöjä jo alussa, ja parempi hyötysuhde takaisi säästöjen jatkumisen käyttöiän aikana. Mikäli sähköjärjestelmällä varustettu laite rakennetaan, sen takaisinmaksuajaksi tulisi noin 20 vuotta. Tulos perustuu työn ohessa tehtyihin laskelmiin, joissa hintaero jaetaan sähkökäytön paremman hyötysuhteen tuomalla vuotuisella käyttökustannussäästöllä. Takaisinmaksuaika on siis hyvin pitkä, eikä sähköjärjestelmällä päästä välttämättä lainkaan voitolle komponenttien vanhenemisen takia.

## 5.2 Keskinäinen vertailu

Sekä sähköhydraulinen että kokonaan sähköinen toteutus vähentävät hydrauliiikan määrää LT120E:ssä merkittävästi. Kuten edellisessä luvussa todettiin, ehdotukset eroavat toisistaan ainoastaan sylinteritoimintojen osalta. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki prosessitoiminnot toteutetaan samoilla komponenteilla ja niillä on sama hyötysuhde tuolloin. Koska murskausprosessi kattaa ehdottomasti suurimman osan laitteen toiminta-ajasta, ja kummankaan ehdotuksen muissa toiminnoissa ei pitäisi syntyä merkittäviä häviöitä, voidaan kokonaishyötysuhteiden olettaa olevan lähellä toisiaan. Kaiken lisäksi se pieni ero, mikä tehokkuuksissa on, kumotaan monta kertaa teholähteen valinnassa. Vaikka dieselmoottorien hyötysuhteen teoreettinen paras arvo onkin jopa 0,7, siihen ei millään tuotantomoottorilla vielä päästä. Parhaidenkin auton moottoreiden hyötysuhteet ovat 0,45:n luokkaa, mutta LT120E:ssä käytettävässä dieselmoottorissa turvallinen arvio on vielä alle 0,4 [39, s. 23]. Sitä käytettäessä koko laitteen hyötysuhteeksi saadaan täysin sähköisellä laitteella noin 0,38 ja sähköhydraulisella vielä vähemmän. Vastaavasti taas Plug-in -toimintoa, eli ulkoista virtalähdettä käytettäessä päästään huomattavasti parempiin tuloksiin. Täyssähköisessä laitteessa murskaimelle voidaan saada teho jopa 0,95 hyötysuhteella. Keskiteytyssä sähköhydraulisessa järjestelmässä päästään vain 0,63 tehokkuuteen, mutta ehdotettu hajautettu järjestelmä parantaisi hyötysuhdetta jonkin verran tästä. Käytettäessä ulkoista tehonlähdettä on hyvä muistaa tehon kuitenkin tulevan jostakin. Jos se esimerkiksi tuotetaan laitteen vieressä dieselgeneraattorilla, ympäristönäkökulma ja parantunut hyötysuhde kumoutuvat. Kansallisesta sähköverkosta otetussa tehossa taas nämä arvot riippuvat, millä keinolla sähkö on tuotettu. Hyötysuhdeluvut perustuvat J. Jonkan Metsolla suorittamaan selvitykseen erilaisten tehollähteiden ja voimansiirtoketjujen vaikutuksesta LT106:n hyötysuhteeseen. Ne soveltuvat myös tähän laitteeseen, koska kyseessä on samanlainen leukamurskainlaitos. [9]

Hyötysuhteiden näkökulmasta taloudellista eroa saadaan siis aikaan vasta Plug-in hyötysuhteita vertailemalla. Laitteiden merkittävimmät erot ilmenevätkin hankintakustannuksissa ja takaisinmaksuajassa. Kuten luvussa 5.1 todettiin, sähköjärjestelmä on huomattavasti kalliimpi kuin kumpikaan hydraulinen toteutus, ja näin ollen myös takaisinmaksu-aika sillä on todella pitkä. Sähköversion hintaa saataisiin toisaalta laskettua jonkin verran, jos sylinterit koottaisiin itse planeettaruuveista ja sähkömoottoreista. Tällöin laitteen suunnitteluun jouduttaisiin uhraamaan enemmän aikaa, koska ruuvien tarvitsemat tuennat ja koteloinnit sekä ohjaustekniikka ja johdotus täytyisi toteuttaa itse.



## 6. LAITTEEN TULEVAISUUS

Metso aikoo luultavasti kehittää murskauslaitoksiaan kohti sähköisempiä toteutuksia tulevaisuudessa, sillä kuten työn alussa todettiin, tämä on teollisuudessa vallitseva trendi. Sähkökäytön potentiaalinen ekologisuus verrattuna polttomootorikäyttöön varmistaa, ettei se ole ohimenevä. Sähkön todellinen ympäristöhyöty riippuu tietenkin siitä, miten se on valmistettu. Ilmastoasioista keskustellaan paljon mediassa ja politiikassa, mikä painostaa yrityksiä panostamaan näihin arvoihin. Ympäristöystävällisempään suuntaan kulkeminen ei ole nykyään enää vain hyvä asia itsessään, vaan myös myyntivaltti yrityksille. Kiristyvät määräykset mm. päästöissä pakottavat valmistajia kehittämään laitteitaan, ja kun saavutaan siihen pisteeseen, ettei käytössä olevaa teknologiaa ole järkevää tai mahdollista parantaa riittävästi, on mietittävä korvaavia ratkaisuja.

Kuten todettu, Plug-in toiminnolla päästää huomattavasti parempaan hyötysuhteeseen kuin dieselmoottorilla, mutta tätä ominaisuutta ei syystä tai toisesta hyödynnetä tällä hetkellä kovin paljoa. Osasyynä voi olla huono sähköverkon saatavuus työmailla tai mobiilimurskauslaitoksen usein vaihtuva sijainti, jolloin sähkö saatavuus täytyisi taata hyvin laajalla alueella. Tulevaisuudessa voidaan nähdä täysin akkukäyttöisiä laitteita, jotka pysyvät yhdellä latauksella toimimaan koko työpäivän tauotta. Metso tekee selvitystä yhdessä VTT:n kanssa tällaisesta laitteesta tällä hetkellä. Akkukäyttöön siirtymistä jouduttavat kiristyvät polttomoottorien päästörajoitukset. Etenkin EU:n ja Pohjois-Amerikan alueilla päästömääräykset sanelevat kuinka paljon moottorivalmistajat joutuvat panostamaan kehitystyöhön ja testaukseen. Tämä johtaa moottorien hinnan nousuun väistämättä. Jos päästörajoja tiukennetaan jatkossakin, saavutaan lopulta tilanteeseen, jossa ei ole enää kannattavaa hyödyntää ainoastaan polttomoottoreita liikkuvissa työkoneissa.

## 7. YHTEENVETO JA ANALYSOINTI

Työssä tutkittiin Metso Mineralsin LT120E -mobiilimurskauslaitoksen sähköistämistä. Tarkoituksena oli selvittää, olisiko hydraulitoimintojen muuttaminen sähköisiksi mahdollista, järkevää ja kannattavaa. Kyseessä oli esiselvitys aiheesta, joten suunnittelu jäi teknisellä tasolla vähäisemmäksi, esimerkiksi komponenttien tilan käyttöä mietittiin vain suurpiirteisesti. Sähkökomponenttien mitoituksessa ja valinnassa auttoi Bosch Rexroth, jonka komponentteja työssä myös käytetään esimerkkinä. Murskauslaitoksen toimintaympäristöä ja osakokonaisuuksien toimintaa tutkittiin, ja voimansiirrosta muodostettiin kaksi ehdotusta; täysin sähköinen ja sähköhydraulinen versio. Niitä vertailtiin toisiinsa, sekä nykyiseen LT120E:hen, jotta Metso saisi selkeän kokonaiskuvan vaihtoehtoista.

LT120E murskaa kiveä Metson C120 leukamurskaimella, tämän lisäksi sen syötin erottelee liian pienen materiaalin pois sivukuljettimelle ja murskattu tuote siirretään pääkuljettimella eteenpäin. Siihen on lisäksi saatavana optiona mm. magneettierotin, joka poistaa murskatusta tuotteesta metallit. Laite perustuu LT120-murskauslaitokseen, mutta E-malliin on lisätty sähköisiä toimintoja jonkin verran. Voimansiirto tapahtuu myös lähtökohtaisesti sähköllä, sillä kyydissä oleva dieselmoottori ajaa sähkögeneraattoria. Sen tuottamaa sähkötehoa käytetään joko suoraan toimilaitteilla, tai se muunnetaan suurella sähkömoottorilla ja hydraulipumpulla hydrauliseksi tehoksi.

Sähköisten komponenttien käyttö hydraulisten tilalla on ollut kasvava trendi teollisuudessa jo jonkin aikaa, ja esimerkiksi ilmailualalla on siirrytty toteuttamaan MEA (more electric aircraft) periaatetta. Sähkökomponenttien etuina on mm. hydraulikkaa parempi hyötysuhde monissa komponenteissa sekä ympäristölle haitallisen, lämpötilariippuvaisen hydraulijölyn puuttuminen. Toisaalta sähkökomponentit ovat usein kalliimpia kuin hydrauliset ja niiden mekaaniset välitykset vaurioituvat herkemmin, etenkin murskaustyömaan kaltaisissa olosuhteissa. Siellä kivipöly on todella hienojakoista ja leijailee joka paikkaan.

Tärinä on pölyn lisäksi tärkeä ottaa huomioon lopullisessa suunnittelussa, sillä hakkaava leukamurskain ja tärisävä syötin aiheuttavat värähtelyä laitteeseen. Sen välittymistä muualle laitteeseen on pyritty vaimentamaan, mutta kaikkea on mahdoton estää. On myös syytä suunnitella joihinkin laitteen toimintoihin (esim. asetuksen säätöön ja syöttimen laitoihin) vaimennuksia ulkoisia iskuja vastaan. Sähköiset sylinterit muuttavat sähkömoottorin pyörimisliikkeen lineaarisiksi mekaanisilla välityksillä, jotka saattavat vaurioitua akselin suuntaisessa, impulssimaisessa kuormituksessa. Esimerkiksi syöttimen laitasylinteri saattaa rikkoutua, jos suuri kivi pudotetaan laidan päälle eikä kiilasylinteri pysty vastaanottamaan koko iskua.

Työn aikana päätettiin muodostaa kaksi eri ratkaisua LT120E:n sähköistämiseksi. Toinen näistä on täysin sähköinen toteutus, jossa jokainen hydraulitoiminto on korvattu sähköisellä. Sylinteritoimintoihin suunniteltiin Bosch Rexrothin EMC- ja EMC-HD -sähkösylinterejä, joissa pakettiin kuuluu servomoottori, sylinteriosa (käytännössä mekaaninen välitys ja sylinterin varsi), kaapelisarja sekä ohjaus. Tela-ajon voimansiirto, syöttimen täryttimet ja jäähdyttimen pyöritys olivat myös hydraulisia, joten ajo ja täryttimet korvattiin sähkömootoreilla ja taajuusmuuttajilla, ja jäähdytin kiinnitettiin viskokytkimen välityksellä dieselmoottoriin. Näin ollen ehdotuksessa ei ole lainkaan hydraulisia komponentteja.

Toinen ehdotus taas on hajautettu hydraulijärjestelmä sylinteritoiminnoille ja sähköjärjestelmä muille. Toisin sanoen hydrauliset sylinterit ja niitä vastaavat venttiilit pysyvät samoina, niille vain suunnitellaan oma paikallinen hydrauliiikka, jossa neljästä hydraulipiiristä muodostuu hajautettu järjestelmä nykyisen keskitetyn tilalle. Jokaisella piirillä on oma sähkömoottori käyttämässä pumppua, jolloin piirille tulee teho sähköisenä johtoa pitkin. Tela-ajoon, syöttimelle ja jäähdyttimelle puolestaan otetaan samat komponentit sähköisestä versiosta. Tämä sähköhydraulinen toteutus päätettiin ottaa mukaan tutkittavaksi, koska se vähentää hydraulisten toimintojen ja öljyn määrää merkittävästi. Hyötysuhde paranee laitteessa, koska sylinteritoimintoja ei tarvita kovin usein ja piirien sähkömoottorit voidaan sammuttaa, kun niitä ei tarvita.

Kaikissa toteutusvaihtoehtoissa on hyvät ja huonot puolensa, eikä voida sanoa jonkun niistä olevan absoluuttisen oikea. Hajautettu sähköhydraulinen järjestelmä näyttäisi kuitenkin järkevimmältä vaihtoehdolta. Vertailun helpottamiseksi keskeisimmät huomiot on koottu oheiseen Taulukko 5.

**Taulukko 5.** Yhteenveto eri järjestelmärakenteiden hyvistä ja huonoista puolista.

	<i>Hyvää</i>	<i>Huonoa</i>
<i>Keskitetty hydraulijärjestelmä (nykyinen)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tuttu järjestelmä- kenne</li> <li>Komponenttien hyvä saatavuus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Huono hyötysuhde</li> <li>Reititys ja asennus</li> <li>Riippuvainen öljyn ominai- suuksista</li> </ul>
<i>Sähköjärjestelmä</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Öljytön</li> <li>Hyvä hyötysuhde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kallis</li> <li>Uusia komponentteja</li> </ul>
<i>Hajautettu hydraulijärjestelmä</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vähän öljyä</li> <li>Hinta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ei öljytön (edelleen riippu- vainen öljyn ominaisuuksista)</li> </ul>

Nykyisen LT120E:n eduksi voidaan lukea keskitetyn hydraulijärjestelmän tuttu rakenne. Hydraulijärjestelmä on kuitenkin lähes jokaisessa LT-mobiilimurskauslaitoksessa samankaltainen. Tämä helpottaa niin laitteiden suunnittelua, kokoonpanoa kuin huoltoakin. Keskitetyssä järjestelmässä on kuitenkin vaihtoehtoista huonoin hyötysuhde. Hydraulii-  
kan ominaisuudet rajoittavat parasta mahdollista hyötysuhdetta ja pitkät letkut hukkaavat energiaa. Letkut ja putket vaativat myös monta kertaa enemmän tilaa kuin sähköjohdot, koska kääntösäteet eivät salli kovin tiukkoja mutkia. Lisäksi liittimet tarvitsevat suoran osuuden johtimen molemmissa päissä. Suuri määrä öljyä, minkä laite tarvitsee toimiakseen, vaikuttaa myös sen toiminnallisuuteen merkittävästi. Hydraulioöljy on lämpötilakriittistä ainetta, joten erityisesti ääriolosuhteissa lämmitys- ja jäähdytyskapasiteetin tulee olla suuri. Öljy vaikeuttaa myös ympäristölupien saamista työmaille, koska laitteen hajo-  
tessa aine saattaa päästä leviämään ympäristöön. Laitteen tarvitsemia komponentteja on hyvin saatavilla, mutta Metson kokoisella toimijalla saatavuus tuskin tulee muodostu-  
maan ongelmaksi millään komponentilla.

Sähköjärjestelmän eduksi voidaan vastaavasti lukea öljyttömyys. Sähköiset komponentit eivät ole yhtä riippuvaisia lämpötiloista, ja sopivaa lämpötila-aluetta saadaan muutettua materiaalivalinnoilla. Lisäksi sähkökomponenteilla on luonnostaankin hieman parempi hyötysuhde kuin hydraulisilla, joten laite maksaa itsensä takaisin vähitellen. Ikävä kyllä takaisinmaksuaika on pitkä, noin 20 vuotta, joten pikaisiin säästöihin ratkaisulla ei päästä. Pitkä aika johtuu komponenttien korkeasta hinnasta, sillä sähköjärjestelmä maksaa yli kuusi kertaa keskitetyn hydraulijärjestelmän verran. Tämä on perusteltavissa ainakin osit-  
tain teknologian uutuudella. Takaisinmaksuaika on arvioitu siten, että sähköjärjestelmä käyttää dieselmoottoria ja generaattoria. Jos Plug-in -toimintoa hyödynnettäisiin, saatai-  
siin enemmän säästöjä laitteen käytön aikana ja maksuaika lyhenisi huomattavasti johtuen dieselmoottorin huonosta hyötysuhteesta. Oletuksena on, että verkkosähkö ei ole kovin kallista. Tällaisen laitteen suunnittelussa ja testauksessa ongelmaksi saattaa aluksi muo-  
dostua sähkösyntierien toiminta, sillä vastaavia komponentteja ei ole ennen käytetty.

Hajautettu hydraulijärjestelmä puolestaan voittaa hintakilpailun selkeästi, sillä se on noin 10 % halvempi kuin keskitetty järjestelmä. Laite tulee tarvitsemaan lisää sähkökom-  
ponentteja ohjaukseen, eikä niiden hintaa arvioitu tässä työssä, joten kustannussäästöt ovat todellisuudessa hieman pienemmät. Toisaalta sen hyötysuhde on parempi ja siinä on vähemmän hydraulikomponentteja sekä öljyä, joten sen ylläpito on myös halvempaa. Ölj-  
jymäärä väheni alkuperäisestä 235 litrasta vain 30 litraan, joten ympäristöriski ja lämpö-  
tilariippuvuus pienenevät tälläkin ratkaisulla. Lämmitys täytyy silti järjestää öljylle, mutta sen kapasiteetin ei tarvitse olla kovin suuri. Jäähdytys puolestaan sujuu itsestään, sillä hydraulitoimintoja (sylinterejä) käytetään harvoin ja lyhyitä aikoja kerralla.

Tällä hetkellä hajautettu hydraulijärjestelmä vaikuttaa parhaalta ratkaisulta. Lineaariliik-  
keen sähkökomponentit ovat edelleen melko hintavia, minkä takia kustannukset nousevat sähköversiossa merkittäviksi. Sylinterit ja niiden tekniikka kattavat yli 90 % korvaavan sähköjärjestelmän hinnasta, olkoonkin että sylinteritoimintoja on paljon. Mikäli

LT120E:stä aiotaan joka tapauksessa tehdä täysin sähköinen tulevaisuudessa, on myös mahdollista, ettei laitteeseen tehdä mitään muutoksia toistaiseksi ylimääräisen suunnittelutyön välttämiseksi. Tulevaisuudessa laite kuitenkin saattaa operoida akkuvirralla kokonaisen työpäivän, jolloin ylimääräisiltä energian olomuodonmuutoksilta vältyttäisiin täysin sähköisen koneen kanssa. Siksi voisi olla järkevää valmistaa ainakin testiversio täysin sähköisestä laitteesta, jotta voidaan kokeilla uusien komponenttien soveltuvuutta murksaustyömaalla.

## LÄHTEET

- [1] G. Abad. Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications. New York: John Wiley & Sons, Incorporated; 2016.
- [2] N. Alle, S. Hiremath, S. Makaram, K. Subramaniam, A. Talukdar. Review on electro hydrostatic actuator for flight control. International Journal of Fluid Power 2016;17(2):125-145.
- [3] Bosch Rexroth. Electromechanical cylinder EMC-HD. 2019:76.
- [4] Bosch Rexroth. Electromechanical cylinders EMC. 2018:94.
- [5] Bosch Rexroth. Electromechanical Cylinders EMC. 2011:60.
- [6] Directorate-General for Research and Innovation (European Commission). European aeronautics: a vision for 2020. 2002:26.
- [7] J. Fonselius, J. Rinkinen, M. Vilenius. Koneautomaatio, Hydraulikka 2. 3rd ed. Tampere: Tampereen Yliopistopaino Oy - Juvenes Print; 2008.
- [8] A. Garcia, I. Cusido, J.A. Rosedo, J.A. Ortega, L. Romeral. Reliable electro-mechanical actuators in aircraft. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine 2008;23(8):19-25.
- [9] J. Jonkka. ELO Efficiencies 10/2018. 2018:4.
- [10] J. Jonkka. Diplomi-insinööri, Development engineer, Metso Minerals Oy, Tampere. Haastattelu 03.12.2018.
- [11] H. Kauranne, J. Kajaste, M. Vilenius. Hydraulikan perusteet. 3-4 ed. Helsinki: WSOY; 2000.
- [12] A. Koskinen. LT120E hydraulikaavio. 2018:4.
- [13] A. Koskinen. Diplomi-insinööri, Chief designer, Hydraulics, Metso Minerals Oy, Tampere. Haastattelu 20.11.2018.
- [14] A. Lajunen, P. Sainio, L. Laurila, J. Pippuri-Mäkeläinen, K. Tammi. Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery. Energies 2018;11(5):1184-1205.
- [15] Metso Corporation. LOKOTRACK LT120E INSTRUCTION MANUAL. 2018:275.
- [16] Metso Corporation. Metso Annual Review 2017. 2017:26.

- [17] Metso Corporation. Lokotrack Liikuteltavat murskaus- ja seulontalaitokset. Saatavilla: <https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/lokotrack-mobiili-murskain-seula-laitokset-fi-3039.pdf>. Viitattu 15.10.2018.
- [18] Metso Corporation. Lokotrack® LT120E™ -leukamurskainlaitos. Saatavilla: <https://www.metso.com/fi/tuotteet/lokotrack-tela-alustaiset-laitokset/lokotrack-lt120e--leukamurskainlaitos/>. Viitattu 15.10.2018.
- [19] Metso Corporation. Lokotrack® LT120™ -leukamurskainlaitos. Saatavilla: <https://www.metso.com/fi/tuotteet/lokotrack-tela-alustaiset-laitokset/lokotrack-lt120--leukamurskainlaitos/>. Viitattu 15.10.2018.
- [20] Metso Corporation. Lokotrack® Urban™ -leukamurskainlaitos. Saatavilla: <https://www.metso.com/fi/tuotteet/lokotrack-tela-alustaiset-laitokset/lokotrack-urban-leukamurskainlaitos/>. Viitattu 09.10.2018.
- [21] Metso Corporation. Metso Metrics Services. Saatavilla: <https://www.metso.com/services/life-cycle-services-for-aggregates/metso-metrics-services/>. Viitattu 30.10.2018.
- [22] Metso Corporation. Nordberg® C120™ leukamurskain. Saatavilla: <https://www.metso.com/fi/tuotteet/leukamurskaimet/nordberg-c--sarjan-leukamurskaimet/nordberg-c120-leukamurskain/>. Viitattu 25.10.2018.
- [23] Metso Corporation. Nordberg® C™ -sarjan leukamurskaimet. Saatavilla: <https://www.metso.com/fi/tuotteet/leukamurskaimet/nordberg-c--sarjan-leukamurskaimet/>. Viitattu 31.10.2018.
- [24] Metso Corporation. Nordberg® NW™ -sarjan leukamurskainvaunut. Saatavilla: <https://www.metso.com/fi/tuotteet/crushing-plants/portable/nordberg-nw--sarjan-leukamurskainvaunut/>. Viitattu 03.12.2018.
- [25] Metso Minerals. LT120E:n moottoridata. 2017:28.
- [26] Metso Minerals Oy. LT120 ja LT120E 3D-malli. 2017:1.
- [27] Metso Minerals Oy. Voimat nivelissä case 7. 2016:7.
- [28] S. Mohan, B. Ramarao. A Comprehensive Study of Self-Induced Torque Amplification in Rotary Viscous Couplings. *Journal of Tribology* 2002;125(1):11-120.
- [29] C. Molyneux. strickland tracks, outline drawing. 2014:1.
- [30] I. Nikkilä. Diplomi-insinööri, Engineering manager, Metso Minerals, Tampere. Haastateltu 04.12.2018.
- [31] nVent. nVent home. Saatavilla: <https://www.erico.com/>.
- [32] J. Rajala. TKF12-48-2V drawing. 2017:2.

- [33] J. Rantanen. Diplomi-insinööri, Engineering Manager, Metso Minerals Oy, Tampere. Haastattelu 14.9.2018, 26.11.2018.
- [34] Sähkötekniikan laitos. Sähkömoottorikäytöt-kurssi, 1. luennon materiaali. 2015:53.
- [35] P. Sainio, M. Heiska, T. Lehmuspelto, J. Suomela. Comparison of packaging hydraulic and electric components in a HEV power line. World Electric Vehicle Journal 2009;3(4):777-786.
- [36] J. Särkinen. PL90 feeder drawing. 2017:1.
- [37] B. Sarlioglu, C. Morris. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft. IEEE Transactions on Transportation Electrification 2015;1(1):54-64.
- [38] statista. Revenue of the worldwide leading aircraft manufacturers and suppliers in 2016 (in million U.S. dollars). Saatavilla: <https://www.statista.com/statistics/264366/revenue-of-the-worldwide-leading-aircraft-manufacturers-and-suppliers/>. Viitattu 7.11.2018.
- [39] S. Tikkanen. Teholähteet, IHA-2240. 2017:41.
- [40] B. Walsh. Raring to Fight: The U.S. Tangles with China over Rare-Earth Exports. Time 2012.



## LIITE A: LT120:N JA LT120E:N ANTURIDATA

Seuraavalta sivulta löytyvään Taulukko 6 on kerätty koneiden vertailussa käytetty data. Tiedot ovat alun perin Metso Metrics -portaalista ja osa löytyneistä koneista karsittiin listauksesta kappaleessa Motivaatio kerroitu perustein. Taulukon lukemisen helpottamiseksi, alla lista sarakkeiden merkityksistä. Listassa termillä ”prosessi” tarkoitetaan laitteen työskentelyä, eli murskaamista tai liikkumista teloilla.

1. Konetyyppi: koneen tyyppi (LT120 vai LT120E).
2. Kone nro: normaalisti Metso käyttää sarjanumeroa jokaisen koneen yhteydessä, mutta koska tämä tieto ei ole luokiteltu julkiseksi, numerointi on juokseva 1:stä alkaen.
3. Moottoritunnit (h): moottorin käynnissä oloaika tunteina.
4. Käyttötunnit (h): kauanko laitetta on käytetty prosessissa tuntimääräisesti.
5. Kulutus (l): kulutus laitteen käynnissä oloaikana.
6. Keskim. kulutus (l/h): kokonaiskulutus jaettuna moottoritunneilla.
7. Teholl. kulutus/ käyttötunnit (l/h): Laitteen kulutus tehollisten moottorituntien aikana, ts. paljonko laite kuluttaa keskimäärin prosessin aikana.
8. Kuormitustunnit/kokonaistunnit (%): Kuinka monta prosenttia laitteen käynnissä oloajasta prosessi on ollut käynnissä.

**Taulukko 6.** LT120:n ja LT120E:n anturidata.

Kone- tyyppi	Kone nro	Mootori- tunnit (h)	Käyttö- tunnit (h)	Kokonais- kulutus (l)	Keskim. kulutus (l/h)	Teholl. kulutus/ käyttötunnit (l/h)	Kuormitustunnit/ kokonaistunnit (%)
LT120E	1	3240	2672	86394	27	26,0	82,5 %
LT120E	2	7388	5356	118330	16	15,4	72,5 %
LT120E	3	8826	7326	179254	20	26,7	83,0 %
LT120E	4	2135	1593	35527	17	23,6	74,6 %
LT120	5	3392	2923	65461	19	22,5	86,2 %
LT120	6	4108	3467	75949	18	22,3	84,4 %
LT120	7	1432	1237	48638	34	37,3	86,4 %
LT120	8	905	770	27534	30	38,9	85,1 %
LT120	9	1112	812	26261	24	35,2	73,0 %
LT120	10	4845	4003	128003	26	29,1	82,6 %
LT120	11	1739	1554	37462	22	30,0	89,4 %
LT120	12	1518	1121	37064	24	32,4	73,8 %

## LIITE B: SÄHKÖHYDRAULISEN TOTEUTUKSEN LASKUT JA OSAT

Sähköhydraulisen järjestelmän mitoitus alkaa syöttimen laitoja operoivasta piiristä. Kaikkien piirien painetasoksi valitaan 250 bar. Koska sylinterit ovat jo valmiina, selvitetään niiden tarvitsema tilavuusvirtaus. Nostossa käytetään kolmea 60/40x400 ja lukituksessa neljää 40/20x230 sylinteriä. Niitä ei ajeta samaan aikaan, joten lasketaan noston ja lukituksen sylinterien virtausvaatimukset erikseen ja mitoitetaan piiri suuremman tarpeen mukaan. Liikeajan on oltava 10-20 s, käytetään mitoituksessa alarajoja. Tilavuusvirta saadaan laskettua kaavasta

$$Q = vA \quad (11)$$

jossa  $Q$  on virta,  $v$  on sylinterin männän liikenoisuus ja  $A$  männän pinta-ala. Suurempi tilavuusvirtavaatimus on aukiliikkeellä, koska vaikka liikenoisuus on sama molempiin suuntiin, pinta-ala on sylinterin A-puolella suurempi. Nopeus voidaan selvittää kaavalla

$$v = \frac{l}{t} \quad (12)$$

jossa  $l$  on liikuttu matka ja  $t$  liikeaika. Männän ala saadaan puolestaan laskettua kaavasta 6. Kun nämä tiedot lisätään kaavaan 11, ja sijoitetaan säteeksi  $r$  männän säde, liikeajaksi 10 s ja matkaksi iskun pituus, saadaan nostosylinterien virraksi

$$\begin{aligned} Q &= 3 * vA = 3 * \frac{l}{t} * \pi r^2 = 3 * \frac{400 \text{ mm}}{10 \text{ s}} * \pi * (30 \text{ mm})^2 \\ &= 3 * \frac{0,4 \text{ m}}{10 \text{ s}} * \pi * (0,03 \text{ m})^2 \sim 0,000339 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \sim 20,36 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

eli noin 20,4 l/min. Lukitus sylinterien virta puolestaan on samalla menetelmällä

$$\begin{aligned} Q &= 4 * \frac{l}{t} * \pi r^2 = 4 * \frac{230 \text{ mm}}{10 \text{ s}} * \pi * (20 \text{ mm})^2 \\ &= 4 * \frac{0,23 \text{ m}}{10 \text{ s}} * \pi * (0,02 \text{ m})^2 \sim 0,000115 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \sim 6,94 \frac{\text{l}}{\text{min}} \end{aligned}$$

eli noin 6,9 l/min. Laitoja nostavat sylinterit vaativat siis suuremman virtauksen. Pumpua valittaessa lasketaan ensin vielä sen pyörimisnopeus. Mitä nopeammin pumppu pyörii, sitä pienempi se voi olla, joten valitaan sähkömoottoriksi kaksinapaparin oikosulkumoottori kolminapaparin sijaan. Tällöin sähkömoottorin pyörimisnopeus 50 Hz taajuudella on kaavan 8 mukaan

$$n = \frac{60 * f}{p_p} = \frac{60 * 50 \text{ Hz}}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

ja nyt pumpulta vaadittava kierrostilavuus voidaan laskea. Sen kaava on

$$V_p = \frac{Q}{n * \eta_{vol}} \quad (13)$$

jossa  $V_p$  on kierrostilavuus,  $Q$  tilavuusvirta,  $n$  pyörimisnopeus ja  $\eta_{vol}$  pumpun volumetrinen hyötysuhde. Koska Bosch Rexroth ei ilmoita pumppujensa volumetrisia tai hydromekaanisia hyötysuhteita, arvioidaan  $\eta_{vol}$  arvoksi 0,95. Kierrostilavuuden arvoksi saadaan

$$V_p = \frac{Q}{n * \eta_{vol}} = \frac{20,357 \dots \frac{l}{min}}{1500 \text{ rpm} * 0,95} \sim 0,014 \frac{l}{rev} = 14 \frac{cm^3}{rev}$$

eli noin  $14 \text{ cm}^3/\text{rev}$ . Valitaan siis pumpuksi AZPF-11-014, jonka kierrostilavuus on tasan  $14 \text{ cm}^3/\text{rev}$ . Seuraavaksi pumpulle mitoitetaan sopiva sähkömoottori. Oikosulkumoottori on kestävyuden, halvan hinnan ja korkean käynnistysmomentin ansiosta hyvä valinta. Sähkömoottorilta vaadittu teho saadaan kaavasta

$$P = \frac{Q * p}{\eta_t} \quad (14)$$

jossa  $P$  on pumpun teho,  $Q$  sen tuottama tilavuusvirta,  $p$  piirin painetaso ja  $\eta_t$  pumpun kokonaishyötysuhde. Tuotettu tilavuusvirta saadaan selville kaavasta 11 nyt kun kierrostilavuus on tiedossa. Kokonaishyötysuhdettakaan Bosch Rexroth ei ilmoita, joten arvioidaan sen arvoksi 0,9. Kaavasta 14 saadaan vaadituksi tehoksi

$$\begin{aligned} P &= \frac{Q * p}{\eta_t} = \frac{V_p * n * \eta_{vol} * p}{\eta_t} = \frac{14 \frac{cm^3}{rev} * 1500 \text{ rpm} * 0,95 * 250 \text{ bar}}{0,9} \\ &= \frac{14 * 10^{-6} \frac{m^3}{rev} * 25 \frac{1}{s} * 0,95 * 25 * 10^6 \text{ Pa}}{0,9} \sim 9236,11 \text{ W} \end{aligned}$$

eli noin 9,2 kW. Metson järjestelmästä löytyy paljon sähkömoottoreita, valitaan niistä 11 kW oikosulkumoottori. Koska nykyisen LT120E:n venttiililohkoa voidaan käyttää edelleen, sitä ei tarvitse mitoittaa lainkaan. Sen sijaan, lasketaan seuraavaksi tarvittava öljytilavuus. Sylinterit varastoivat ehdottomasti suurimman osan tankin ulkopuolisesta öljystä järjestelmässä, joten lasketaan niiden tilavuus täysin avattuina. Yhden sylinterin tilavuus saadaan kaavalla  $V = A * l$ , jossa  $V$  on tilavuus,  $A$  männän pinta-ala ja  $l$  sylinterin iskun pituus. Koska käytössä on kolme 60/40x400 ja neljä 40/20x230 sylinteriä, koko kaava on

$$V = 3 * A_1 * l_1 + 4 * A_2 * l_2$$

jossa  $A_1$  on suuremman sylinterin männän ala,  $l_1$  sen iskun pituus,  $A_2$  pienemmän männän ala ja  $l_2$  iskun pituus. Ympyrän ala saadaan kaavasta 6, joten tilavuus on

$$\begin{aligned}
 V &= 3 * A_1 * l_1 + 4 * A_2 * l_2 \\
 &= 3 * \pi * (0,03 \text{ m})^2 * 0,4 \text{ m} + 4 * \pi * (0,02 \text{ m})^2 * 0,23 \text{ m} \sim 0,0045 \text{ m}^3 \\
 &= 4,5 \text{ dm}^3
 \end{aligned}$$

eli noin 4,5 litraa. Jos pinnankorkeuden vaihtelu pitäisi normaalissa säiliössä pitää 50-75 % suuruusluokassa [7, s. 211], öljyä on oltava vähintään kaksinkertainen määrä. Pyöristetään öljytilavuus suoraan 10 l. Vastaavasti tankin tilavuudeksi valitaan tällöin 20 l. Normaalisti hydraulitankki vaatii huohottimen, mutta valitaan tankiksi paisuntasäiliö, jolloin öljytilavuuden muutokset eivät aiheuta ongelmia ja ylimääräisiä komponentteja ei tarvita. Letkujen tarkka mitoitus on hankalaa, koska piirin rakennetta ei ole suunniteltu. Arvioidaan siis niitä karkeasti. Imuletkun ei tarvitse olla kovin pitkä, koska tankki ja pumppu ovat pieniä ja mahtuvat lähelle toisiaan, joten arvioidaan sen olevan 1 m. Painelinjoja ei välttämättä tarvita lainkaan, jos ohjausventtiili saadaan kiinnitettyä pumppuun. Sylinterilinjojen pituudet taas riippuvat täysin komponenttien sijoittelusta, mutta ne eivät ole keskimäärin luultavasti pidempiä kuin 3 m. Niitä tulee 2 kpl per sylinteri, A- ja B-puolille omansa. Paluulinja venttiililtä tankkiin puolestaan olisi tällä mitoituksella saman mittainen kuin imulinjakin. Lasketaan sopivat letkukoot virtausnopeuden perusteella kaavasta 9. Imulinjan virtausnopeus on tyypillisesti 0,5-1,5 m/s ja paluulinjan 1-3 m/s, joihin päästään esimerkiksi 19 mm sisähalkaisijan letkulla. Virtausnopeus on tarkkaan ottaen

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{V_p * n * \eta_{vol}}{\pi * r^2} = \frac{14 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{rev}} * 25 \frac{1}{\text{s}} * 0,95}{\pi * (0,0095 \text{ m})^2} \sim 1,17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

eli noin 1,2 m/s. Painelinjoissa puolestaan virtausnopeus on 4-6 m/s. Kokeillaan 10 mm halkaisijalla olevaa letkua, jolloin virtausnopeus on

$$v = \frac{V_p * n * \eta_{vol}}{\pi * r^2} = \frac{14 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{rev}} * 25 \frac{1}{\text{s}} * 0,95}{\pi * (0,005 \text{ m})^2} \sim 4,23 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

eli noin 4,2 m/s, joka riittää oikein hyvin. Valitaan letkuksi EN857 standardin 2SC-letkua, jossa on kaksi ristikudoskerrosta, koska sitä käytetään Metsolla paljon, se on melko ohutta ja kestää silti valitut painetasot. Imu- ja paluulinjassa paine on huomattavasti matalampi kuin painepuolella, joten ei haittaa vaikkei 19 mm letku kestä 250 bar painetta.

Nyt kun syöttimen laitojen piiri on mitoitettu, lasketaan samalla tavalla kaksi muuta piiriä. Tässä ei enää käydä yhtä yksityiskohtaisesti jokaista vaihetta läpi, sillä ne tehdään samassa järjestyksessä ja lähes samaan tapaan kuin edellinenkin. Asetuksen säädön ja kuljettimen noston piirissä toimintoja ei käytetä samanaikaisesti, joten selvitetään kumpi toiminto vaatii suuremman tilavuusvirran. Asetuksen säädössä käytetään kahta 100/56x250 (kaavassa alaindeksi 1) ja yhtä 80/50x350 (kaavassa alaindeksi 2) sylinteriä ja niiden matka-ajan alaraja on 17 s. Niiden vaatima tilavuusvirta on siis

$$\begin{aligned}
Q &= 2 * v_1 A_1 + v_2 A_2 = 2 * \frac{l_1}{t} * \pi r_1^2 + \frac{l_2}{t} * \pi r_2^2 = \frac{\pi}{t} * (2 * l_1 r_1^2 + l_2 r_2^2) \\
&= \frac{\pi}{17s} * (2 * 0,25m * (0,05m)^2 + 0,35m * (0,04m)^2) \sim 0,334 \\
&* 10^{-3} \frac{m^3}{s} \sim 20,07 \frac{l}{min}
\end{aligned}$$

eli noin 20 l/min. Kuljettimen nostossa puolestaan käytetään kahta 60/32x250 (alaindeksi 3 kaavoissa) sylinteriä, sille ei ole annettu rajoitusta liikkeen kestolle mutta käytetään 10 s, koska se on yleinen raja muissakin toiminnoissa. Niiden vaatima tilavuusvirta on

$$Q = 2 * v_3 A_3 = 2 * \frac{l_3}{t} * \pi r_3^2 = 2 * \frac{0,25m}{10s} * \pi * (0,03m)^2 \sim 0,14 * 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

eli noin 8 l/min. Asetuksen säätö vaatii suuremman virtauksen, joten mitoitetaan komponentit sen mukaan. Koska vaadittu tilavuusvirta on lähes sama, kuin syöttimen laitojen piirissä, voidaan käyttää samaa pumppua ja sähkömoottoria, ja siirtyä suoraan öljytilavuuden laskuun. Piirin sylinterit vaativat öljyä yhteensä

$$\begin{aligned}
V &= 2 * l_1 * \pi r_1^2 + l_2 * \pi r_2^2 + 2 * l_3 * \pi r_3^2 \\
&= 2 * 0,25m * \pi * (0,05m)^2 + 0,35m * \pi * (0,04m)^2 + 2 * 0,25m * \pi \\
&* (0,03m)^2 \sim 7,1 * 10^{-3} m^3
\end{aligned}$$

eli noin 7 l. Tälle piirille voidaan varata hieman enemmän ylimääräistä öljyä, koska asetuksen säätöä käytetään melko paljon. Pyöristetään öljytilavuus siis 15 litraan, jolloin voidaan käyttää myös samaa 20 litran paisuntasäiliötä tankkina tässä piirissä. Letkutkin voivat olla samat, koska tilavuusvirta on sama. Lisätään vielä yksi 0,5 m pitkä ja 10 mm halkaisijaltaan oleva letku piirin paineakkua varten.

Viimeisenä mitoitetaan pääkuljettimen taittosylinterien piiri. Sen tilavuusvirtavaatimus saadaan samoin kuin edellä muidenkin piirien, sylinterit ovat 80/56x830, avauksen aikaraja on 65 s ( $t_1$ ) ja sulkemisen 40 s ( $t_2$ ). Lasketaan niiden tilavuusvirrat erikseen. Avauksen virtaus on

$$Q = 2 * v A = 2 * \frac{l}{t_1} * \pi r^2 = 2 * \frac{0,83m}{65s} * \pi * (0,04m)^2 \sim 0,128 * 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

eli noin 7,7 l/min. Sulkemisen virta saadaan samalla tavalla, mutta kaavassa täytyy vähentää männän alasta ( $A_1$ ) varren poikkileikkauksen ala ( $A_2$ ), jotta männän B-puolen ala saadaan selville. Tilavuusvirta on

$$\begin{aligned}
Q &= 2 * v * (A_1 - A_2) = 2 * \frac{l}{t_2} * (\pi r_1^2 - \pi r_2^2) = 2 * \frac{l}{t_2} * \pi (r_1^2 - r_2^2) \\
&= 2 * \frac{0,83m}{40s} * \pi * ((0,04m)^2 - (0,028m)^2) \sim 0,106 * 10^{-3} \frac{m^3}{s}
\end{aligned}$$

eli noin 6,4 l/min. Mitoitetaan piiri siis 7,7 l/min virtausta varten. Pidetään edelleen painetaso samana ja pumppua pyörittävän sähkömoottorin napapariluku kahtena. Tällöin pyörimisnopeus säilyy samana myös, ja pumpulta toivottu kierrostilavuus on

$$V_p = \frac{Q}{n * \eta_{vol}} = \frac{7,702 \dots \frac{l}{min}}{1500 rpm * 0,95} \sim 0,005405 \frac{l}{rev}$$

eli noin 5,4 cm<sup>3</sup>/r. Valitaan pumpuksi Bosch Rexrothin AZPF-11-005, joka on myös hammaspyöräpumppu ja sen kierrostilavuus on 5,6 cm<sup>3</sup>/r. Näin ollen sähkömoottorilta vaaditaan tehoa

$$\begin{aligned} P &= \frac{Q * p}{\eta_t} = \frac{V_p * n * \eta_{vol} * p}{\eta_t} = \frac{5,6 \frac{cm^3}{rev} * 1500 rpm * 0,95 * 250 bar}{0,9} \\ &= \frac{5,6 * 10^{-6} \frac{m^3}{rev} * 25 \frac{1}{s} * 0,95 * 25 * 10^6 Pa}{0,9} \sim 3694,44 W \end{aligned}$$

eli noin 3,7 kW. Valitaan järjestelmästä lähimpänä löytyvä 3 kW oikosulkumoottori, sen pyörimisnopeus on hieman vaadittua hitaampi, mikä johtaa hitaampaan sylinteriliikkeen, mutta aikavaatimukset ovat alarajoja. Aavistuksen vajaa teho ei siis haittaa. Öljyttilavuus saadaan jälleen sylinterien tilavuudesta, joka on

$$V = 2 * A_1 * l = 2 * \pi * (0,04m)^2 * 0,83m \sim 0,0083m^3$$

eli noin 8,3 litraa. Pyöristetään tilavuus jälleen 15 litraan ja käytetään samaa 20 litran paisuntasäiliötä kolmannessakin piirissä. Imu- ja paluuletkuiksi voidaan valita 12,5 mm halkaisijaltaan olevaa letkua, koska tällöin virtausnopeus on

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{V_p * n * \eta_{vol}}{\pi * r^2} = \frac{5,6 * 10^{-6} \frac{m^3}{rev} * 25 \frac{1}{s} * 0,95}{\pi * (0,00625 m)^2} \sim 1,08 \frac{m}{s}$$

joka sopii molempiin oikein hyvin. Vastaavasti sylinterilinjoiissa voidaan käyttää esimerkiksi 6,3 mm kokoista letkua, silloin virtausnopeus on

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{V_p * n * \eta_{vol}}{\pi * r^2} = \frac{5,6 * 10^{-6} \frac{m^3}{rev} * 25 \frac{1}{s} * 0,95}{\pi * (0,00315 m)^2} \sim 4,27 \frac{m}{s}$$

joka myös sopii hyvin. Taaskaan painelinjaa pumpulta venttiilille ei mitoiteta, vaan oletetaan, että lohkon saa pumppuun kiinni.

Nyt kun piirien kaikki pääkomponentit on mitoitettu, voidaan helposti arvioida sähköhydraulin toteutuksen kustannuksia. Ohessa oleva listaus, Taulukko 7, esittelee osat. Siihen lisättiin vielä paluusuodatin jokaiseen piiriin tilavuusvirran perusteella. Lisäksi koneen

käyttöiäksi arvioitiin 10 vuotta, jolloin voidaan huomioida suodattimen elementin vaihtoväli (1000 h, eli noin puolen vuoden välein) sekä hydraulioöljyn vaihtoväli (2000 h). Tästä syystä suodatinelementtejä on merkattu 20 kpl ja öljyeriä 10 kpl. Öljynä laskennassa käytettiin tavallista ISO VG 46 -hydraulioöljyä, koska sitä käytetään vakiona muisakin Metson laitteissa. Poikkeavat olosuhteet kohdemaassa vaikuttavat valittavaan öljyyn luonnollisestikin. Hintoja taulukkoon ei voitu lisätä, koska ne ovat salaisia. Taulukon lopussa, osassa, kohdassa piiri 4, on esitelty sähkökomponentit.

**Taulukko 7.** Sähköhydraulisen toteutuksen kaikki mitoitettut komponentit.

<b>Piiri</b>	<b>Komponentti</b>	<b>Määrä (kpl)</b>
1. Syöttimen laidat	Sylinteri, 60/40x400	3
	Sylinteri, 40/20x230	4
	Pumppu, AZPF-11-022	1
	Sähkömoottori, oikosulku, 11 kW	1
	Venttiililohko	1
	Vastaventtiilejä	2
	Paluusuodatin	1
	Letku, 3 m, EN857-2SC, Ø 10 mm	14
	Letku, 1 m, EN857-2SC, Ø 19 mm	2
	Öljy, 10 l, ISO VG 46	10
	Säiliö, 20 l	1
	Suodattimen elementti	20
2. Asetuksen säätö ja kuljettimen nosto	Sylinteri, 100/56x250	2
	Sylinteri, 80/50x350	1
	Sylinteri, 60/32x250	2
	Pumppu, AZPF-11-022	1
	Sähkömoottori, oikosulku, 11 kW	1
	Venttiililohko, asetuksen säätö	1
	Venttiililohko, kuljettimen nosto	1
	Vastaventtiili	2
	Paineanturi	1
	Paineakku	1
	Paluusuodatin	1
	Letku, 3 m, EN857-2SC, Ø 10 mm	10
	Letku, 1 m, EN857-2SC, Ø 19 mm	2
	Letku, 0,5 m, EN857-2SC, Ø 10 mm	1
	Öljy, 15 l, ISO VG 46	10
	Säiliö, 20 l	1
	Suodattimen elementti	20
3. Kuljettimen taitto	Sylinteri, 80/56x830	2
	Pumppu, AZPF-11-005	1
	Sähkömoottori, oikosulku, 3 kW	1
	Venttiililohko	1
	Vastaventtiili	3
	Paineenrajoitusventtiili	2
	Paluusuodatin	1
	Letku, 1 m, EN857-2SC, Ø 12,5 mm	2
	Letku, 3 m, EN857-2SC, Ø 6,3 mm	4

4. Muut	Öljy, 15 l, ISO VG 46	10
	Säiliö, 20 l	1
	Suodattimen elementti	20
	Telamoottori	2
	Taajuusmuuttaja, telamoottorille	2
	Viskokytkin, jäähdyttimelle	1
	Tärytin, syöttimelle	2